

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Piha

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Suzana Jakovljević

Student:

Karlo Piha

Zagreb, 2018.

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad na temu "Utjecaj vlage na mehanička svojstva bambusa za izradu bicikla" izradio samostalno uz potrebne konzultacije, savjete, stečena znanja tijekom studija i uporabu navedene literature.

Karlo Piha

Zahvala

Zahvaljujem se mentorici izv.prof.dr.sc. Suzani Jakovljević, na pristupačnosti i strpljenju, zalaganju, savjetima i pomoći pri izradi ovoga diplomskog rada.

Zahvaljujem se Božidaru Bušetinčanu, tehničkom suradniku iz Laboratorija za polimere i kompozite, na iznimnom trudu pri izradi epruveta za ispitivanje žilavosti i tvrdoće i na korisnim savjetima.

Zahvaljujem se Ivanu Martinku, tehničkom suradniku iz Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstva, na trudu pri ispitivanjima uzoraka na izvijanje.

Posebno se zahvaljujem: mojoj djevojci Matei, braći Antoniu i Valentinu, baki Adeli i pokojnom djedu Antunu na razumijevanju i podršci koju su mi pružili.

Rad posvećujem mojim roditeljima, Draženki i Nenadu, kojima sam neizmjereno zahvalan na trudu, razumijevanju, odricanju, podršci i pruženoj ljubavi.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Piha** Mat. br.: 0035186372

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj vlage na mehanička svojstva bambusa za izradu bicikla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of Humidity on Mechanical Properties of Bamboo for Bicycles**

Opis zadatka:

Prirodni materijali imaju obnovljiv izvor energije te je njihova primjena sve popularnija. Povećanjem svijesti o zaštiti okoliša i smanjenim resursima rude i nafte potiče se primjena prirodnih materijala. Bambus kao prirodni materijal nalazi svoju primjenu kao bio-gorivo, pri izradi namještaja, parketa, u građevini, kod vozila, itd.

U ovom je radu potrebno:

1. dati prikaz primjene prirodnih materijala
2. navesti vrste bambusa i njihove karakteristike
3. prema dostupnoj literaturi napisati dosadašnja istraživanja bambusa
4. za vrstu bambusa, koja se primjenjuje kod izrade bicikla, ispitati žilavost, izvijanje i tvrdoću prije i nakon izlaganja uvjetima u vlažnoj komori
5. komentirati dobivene rezultate te dati zaključak.

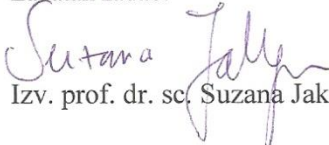
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
16. studenog 2017.

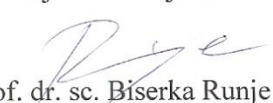
Datum predaje rada:
18. siječnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. BIKIKL	2
2.1. Vrste bicikla ovisno o namjeni.....	3
2.2. Konstrukcija okvira bicikla.....	5
2.3. Dijelovi bicikla.....	6
2.4. Materijali okvira bicikla.....	8
2.4.1. Okvir bicikla - prirodni materijali.....	12
3. BAMBUS	17
3.1. Struktura bambusa i kemijski sastav	18
3.2. Osnovna podijela bambusa	21
3.3. Mehanička svojstava bambusa.....	23
3.3.1. Dosadašnja istraživanja mehaničkih svojstava	25
3.4. Bambus - svestran prirodni resurs.....	27
4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE	30
5. ISPITIVANJE U VLAŽNOJ KOMORI – utjecaj vlage	33
6. ISPITIVANJE UZORAKA BAMBUSA NA IZVIJANJE	38
7. MODUL ELASTIČNOSTI	47
8. ODREĐIVANJE ŽILAVOST BAMBUSA	49
9. MIKROSTRUKTURA BAMBUSA UZROKOVALA LOMOM.....	54
10. ISPITIVANJE TVRDOĆE.....	57
11. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1. Izgled prvog bicikla [2]	2
Slika 2. Povijesni prikaz razvoja bicikla [5]	3
Slika 3. Cestovni bicikl	4
Slika 4. Tandem bicikl [7]	5
Slika 5. Opterećenja koja djeluju na okvir bicikla [6]	6
Slika 6. Dijelovi bicikla [12]	7
Slika 7. Dijelovi rame bicikla [13]	8
Slika 8. Okvir bicikla od nehrđajućeg čelika [16]	9
Slika 9. Aluminijski okvir [23]	10
Slika 10. Okvir bicikla od titanove legure [26]	10
Slika 11. Prikaz okvira bicikla magnezijeve legure [26]	11
Slika 12. Okvir bicikla od ugljičnih vlakana [27]	12
Slika 13. Bicikl s drvenim okvirom [28]	13
Slika 14. Bicikl od kartona a) Philea Bridgea [31] i b) Izhara Gafnia [32]	14
Slika 15. Okvir bicikla od baltičke breze [33]	14
Slika 16. Okvir bicikla od konoplje a) i b) naprezanja u okviru [35]	15
Slika 17. Okvir bicikla od bambusa [37]	16
Slika 18. Stabljike bambusa [40]	17
Slika 19. Područja rasta bambusa u svijetu [42]	18
Slika 20. Cilindrična šuplja stapka bambusa [44]	18
Slika 21. Shematski prikaz građe bambusa [41]	19
Slika 22. Poprečni presjek internodija [47]	19
Slika 23. Prikaz grupiranog rizioma bambusa [48]	20
Slika 24. Prikaz uzastopnog rizioma bambusa a) [48] i b) [49]	20
Slika 25. Skela od bambusa [71]	28
Slika 26. Kaciga za motocikl napravljena od bambusa [74]	29
Slika 27. Prototip vrata izrađen od bambusovog kompozitnog materijala [63]	29
Slika 28. Uzorci bambusa za ispitivanje	30
Slika 29. Prikaz uzdužnih puknuća uzoraka na poprečnom presjeku	31
Slika 30. Prikaz uzdužnih puknuća na vanjskoj stijenci	31
Slika 31. Prikaz razlike debljine stijenske dvaju uzoraka sa slike a) i b)	32
Slika 32. Uzorci koji uvelike odstupaju od ostalih uzoraka u pogledu debljine stijenske	32
Slika 33. Sortirani uzorci po skupinama i skladišteni u foliji	32
Slika 34. Mjerenje mase uzoraka	33
Slika 35. Uzorci bambusa pripremljeni za ispitivanje u vlažnoj komori	34
Slika 36. Uzorci postavljeni u vlažnu komoru	34
Slika 37. Uzorci VLAŽNO 10 izvađeni iz vlažne komore nakon 10 dana	35
Slika 38. Grafički prikaz prosječnih iznosa promijene mase i vlage po skupinama	37
Slika 39. Načini učvršćivanja krajeva štapa [76]	38

Slika 40.	Uređaj na kojem su uzorci ispitivani na izvijanje	39
Slika 41.	Prikaz postavljanja uzoraka za ispitivanje	39
Slika 42.	Dijagram izvijanja uzorka S-3	40
Slika 43.	Izvijanje a) i lom b) uzorka S-8	41
Slika 44.	Dijagram izvijanja uzorka S-2	41
Slika 45.	Dijagram izvijanja uzorka V-25.....	43
Slika 46.	Dijagram izvijanja uzorka V-28.....	43
Slika 47.	Uzorak V-2 u trenutku loma a) i uzorci V-4 i V-7 nakon rasterećenja b)	45
Slika 48.	Grafički prikaz naprezanja izvijanja po skupinama	46
Slika 49.	Grafički prikaz modula elastičnosti po skupinama	48
Slika 50.	Uređaj za ispitivanje udarne radnje loma.....	49
Slika 51.	Dimenzije ispitnog uzorka [79].....	50
Slika 52.	Epruvete od V-1 do V-10 pripremljene za ispitivanje udarne radnje loma	50
Slika 53.	Epruvete uzoraka VLAŽNO 10 nakon ispitivanja udarne radnje loma.....	50
Slika 54.	Srednje vrijednosti utrošene energije na Charpyevom batu.....	52
Slika 55.	Srednje vrijednosti udarne radnje loma epruveta u suhom i vlažnom stanju.....	53
Slika 56.	Uređaj a) SEM TESCAN VEGA 5136 MM i b) EMITECH SC7620.....	54
Slika 57.	Prikaz prijeloma uzorka S-8.....	55
Slika 58.	Vaskularni snop i stanice parenhima Tonkin Cane.....	56
Slika 59.	Oštećenje vaskularnog snopa i stanica parenhimaTonkin cane	56
Slika 60.	Uzorci bambusa za ispitivanje tvrdoće	57
Slika 61.	Uređaj Zwick 3106.....	58
Slika 62.	Prikaz mjerenja tvrdoće unutarnje stijenke bambusa.....	58
Slika 63.	Grafički prikaz rezultata uzorka S-2	59
Slika 64.	Grafički prikaz rezultata vanjske prosječne tvrdoće	64
Slika 65.	Grafički prikaz rezultata unutarnje prosječne tvrdoće	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz dosadašnjih istraživanja svojstava bambusa	25
Tablica 2. Podijela uzoraka na skupine	35
Tablica 3. Promjena mase uzoraka VLAŽNO 1	36
Tablica 4. Promjena mase uzoraka VLAŽNO 5	36
Tablica 5. Promjena mase uzoraka VLAŽNO 10	37
Tablica 6. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka SUHO	40
Tablica 7. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka VLAŽNO 1	42
Tablica 8. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka VLAŽNO 5	44
Tablica 9. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka VLAŽNO 10	44
Tablica 10. Rezultati modula elastičnosti za pojedinu skupinu	48
Tablica 11. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: SUHO	51
Tablica 12. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: VLAŽNO 1	51
Tablica 13. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: VLAŽNO 5	52
Tablica 14. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: VLAŽNO 10	52
Tablica 15. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka S-2	59
Tablica 16. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka S-9	60
Tablica 17. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-25	61
Tablica 18. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-29	61
Tablica 19. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-12	62
Tablica 20. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-18	62
Tablica 21. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-1	63
Tablica 22. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-9	63

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
l	mm	duljina uzorka
m	g	masa uzorka
d_1	mm	vanjski promjer
d_2	mm	unutarnji promjer
F_k	N	sila izvijanja
F_b	N	sila kidanja
A	mm ²	površina presjeka
σ_k	N/mm ²	naprezanje izvijanja
I_{min}	mm ⁴	najmanji aksijalni moment presjeka
i	mm	polumjer tromosti
E	Pa	modul elastičnosti
a_{kN}	kJ/m ²	udarna radnja loma
E_c	J	energija loma
h	mm	debljina epruvete
b	mm	širina epruvete
H_k	N/mm ²	tvrdoća
D	mm	promjer kuglice
F	N	sila opterećenja
k	-	korekcija

SAŽETAK

Rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu rada opisana je primjena prirodnih materijala koji se koriste pri izradi bicikla. Navedene su vrste bambusa koje se koriste u konstrukcijske svrhe i njihove karakteristike te je dan pregled dosadašnjih ispitivanja mehaničkih svojstava bambusa prema dostupnoj literaturi. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja žilavosti, izvijanja i tvrdoće, prije i nakon izlaganja uvjetima u vlažnoj komori, bambusa koji se primjenjuje kod izrade bicikla. Na skenirajućem elektronskom mikroskopu analizirana je mikrostruktura bambusa. Dobiveni rezultati komentirani su usporedbom mehaničkih svojstava uzoraka izlaganih u vlažnoj komori i onih koji nisu bili izlagani u vlažnoj komori. Na kraju su dobivena svojstva bambusa uspoređena sa svojstvima ostalih materijala koji se primjenjuju za izradu okvira bicikla.

Ključne riječi: žilavost, izvijanje, tvrdoća, mikrostruktura bambusa, bicikl, vlažna komora

SUMMARY

This thesis consists of a theoretical and experimental part. The theoretical part of the thesis describes the use of natural materials used in bicycle manufacturing, types of bamboo used for construction purposes and their characteristics as well as a review of previous documented tests of the bamboos mechanical properties. In the experimental part of the study, we tested the toughness, curvature, and hardness, before and after exposure to the manufacturing conditions in the humid chamber. A scanning electron microscope was used to analyze the microstructure of bamboo. The obtained results were commented by comparing the mechanical properties of samples exposed to the dark chamber and those that were not exposed to the humid chamber. Finally, the resulting properties of the bamboo were compared with the properties of other materials used for manufacturing the bicycle frame.

Key words: toughness, buckling, hardness, microstructure bamboo, bike, moist chamber

1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina sazrela je osobito u zapadnim zemljama, svijest prema korištenju obnovljivih izvora energije, uzimajući u obzir potrebe budućih generacija. Prirodni materijali imaju obnovljiv izvor energije te je njihova primjena sve popularnija. Povećanjem svijesti o zaštiti okoliša i smanjenim resursima rude i nafte potiče se primjena prirodnih materijala. Jedan od takvih materijala je bambus koji svoju primjenu nalazi kao bio-gorivo, pri izradi namještaja, parketa, u građevini i kod vozila. U industriji vozila razvijaju materijali koji bi smanjili zagađenje tijekom proizvodnje proizvoda, tijekom uporabe i odlaganja proizvoda. Automobili i ostala cestovna vozila pokazuju štetan utjecaj na čovjeka i okoliš i time smanjuju kvalitetu života u gradovima zato se pokušava u cestovni promet sve više uključiti bicikl kao prijevozno sredstvo. Korištenje bicikla kao prijevoznog sredstva sve je učestalije u gradovima razvijenih zemalja čitavoga svijeta. Zbog nedostatne biciklističke infrastrukture korištenje bicikla i biciklistički promet u Hrvatskoj nažalost ne idu ukorak sa svjetskim kretanjima. U Amsterdamu se već godinama ljudi više vozi biciklom nego automobilom, a trend polako slijede Danci i Nijemci. Prema FietsBeraad istraživanju pokazalo se da 30 posto nizozemskih putnika uvijek putuje biciklom, a dodatnih 40 posto ponekad biciklom ide i na posao. U Njemačkoj i Danskoj, više od 20 posto putnika redovito putuje biciklom, a biciklizam čini više od polovice svih putovanja u većini kineskih gradova. Prema istraživanju Worldwatch Instituta globalna proizvodnja bicikala porasla je za 3,2 posto u 2007. godini na 130 milijuna bicikala i stalno je u porastu. [1] Riječ je o najjeftinijem, najbržem i najzdravijem načinu prijevoza, a ujedno i dovoljno sigurnim. Sigurnost se postiže izgradnjom biciklističkih staza. U mnogim gradovima biciklističke staze su potpuno odvojene od ostalih prometnica. Korištenjem bicikla smanjuju se prometne gužve, povećava sigurnost u prometu, štedi se na troškovima za gorivo, parkiranje i održavanje automobila, te se zdravlje stanovništva podiže na viši nivo.

2. BICIKL

Razvoj bicikla kroz povijest

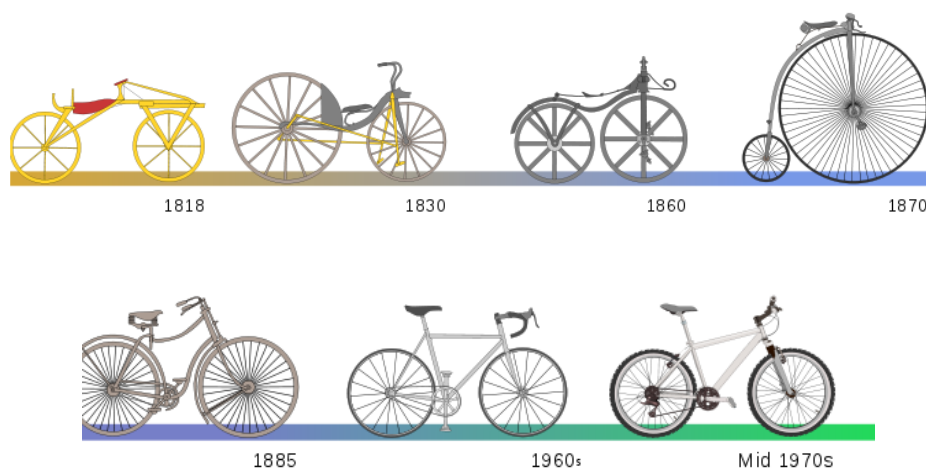
Prvi bicikli uvelike su se razlikovali od današnjih. Nisu bili osobito dobro konstruirani, a još manje udobni, imali su maleno i tvrdo sjedalo. Francuski grof Mede de Sivrac izumio je preteču bicikla 1791. godine. Pokrenuo ga je tako da je koračao i odguravao se nogama o tlo jer nije bilo pedala, a nazvao ga je "celerifere". Visina od najviše točke na biciklu do tla bila je 76,2 cm, a vozilo nije imalo upravljač. Kako bi se kretali tim vozilom, vrlo vješti vozači podigli bi kotač i okrenuli ga u smjeru željenog kretanja. Kasnije je izum preimenovan u "velocipede". U Parizu je dana 06.04.1818. godine njemački baron Karl Drais von Sauerbronn predstavio svoju verziju "celerifera" i nazvao ga "laufmaschine". Izrađen od drva i bez pedala, ali s upravljačem, bicikl se pokretao odguravanjem nogama o tlo. [2]



Slika 1. Izgled prvog bicikla [2]

Godine 1839. škotski kovač Kirkpatrick Macmillan projektirao je prvi bicikl s pedalama i kočnicama. On je na vozilo dodao dvije poluge na obje strane okvira u blizini položaja nogu. Jedan kraj poluge nalazio se na okviru, a drugi kraj je imao kratki nastavak za pedale. Vozač je tako mogao uz pomoć pedala okretati mehanizam koji je pokretao zadnji kotač. To vozilo je zapravo prvo dobilo ime bicikl. Na Macmillanovom biciklu pedale su šipkama bile povezane sa stražnjim kotačem. Zato se kotač okretao vrlo sporo. Godine 1861. Francuzi Pierre i Ernest Michaux povezali su pedale izravno s prednjim kotačem i stvorili prvi uspješni bicikl bez gumenih kotača zvan kostolomac. [2,3]

Godine 1870. James Starley poboljšao je bicikl bez gumenih kotača i dobio je visoki bicikl. Veliki prednji kotač omogućavao je veće brzine s manje pedaliranja. Napredak u metalurgiji omogućio je inovaciju lanaca i zupčanika. Dizajn bicikla vratio se na prethodne modele. Oba kotača bila su jednake veličine. Ipak, ovi bicikli i dalje su imali tvrde gume i vožnja je unatoč prijenosu snage bila ipak neugodna. Godine 1874. H. J. Lawson napravio je prvi bicikl s lančanim prijenosom. Nazvan je sigurnim biciklom jer je bio stabilniji od visokog bicikla. Pneumatske gume su prvi put postavljene na bicikl kada je Britanski izumitelj John Boyd Dunlop pokušao svom sinu omogućiti ugodniju vožnju na njegovom triciklu. 1890. godine dodane su mu gume ispunjene zrakom i tako je nastao moderni bicikl. Današnji bicikl kakvog poznajemo stvoren je od više izuma čemu su pridonijeli brojni izumitelji tijekom godina. Danas je u Kini više ljudi koji voze bicikl od zbroja svih vozača bicikala u ostalom dijelu svijeta. [3,4]



Slika 2. Povijesni prikaz razvoja bicikla [5]

2.1. Vrste bicikla ovisno o namjeni

Ovisno o namjeni, bicikli se bitno razlikuju po konstrukciji, veličini kotača i širini guma, obliku okvira i upravljača, te drugoj dodatnoj opremi. Bicikli se dijele u više kategorija:

- U prvoj grupi se nalaze gradski bicikli, za one koji većinu vremena provode u vožnji po gradu, uz tek povremene izlete u prirodu. Osnovna karakteristika ove vrste bicikala jest spoj čvrstoće i robusnosti (razmjerno teška rama) brdskog bicikla s udobnošću i lakoćom vožnje cestovnog. Dijelev se u kategoriju City i Trekking.

- Drugu grupu čine brdski ili MTB bicikli za zahtjevniji teren. Iako iznimno čvrste i izdržljive konstrukcije, prilično su lagani, manji i znatno širi kotači, a od opreme sadrže samo najnužnije, te su kao takvi idealni za veoma neravne terene. Osnovna podjela brdskih bicikala je konstrukcijska, a vezana je za postojanje odnosno nepostojanje stražnje suspenzije (amortizera).
- Treću grupu čine cestovni bicikli čija je namjena isključivo cestovna vožnja. Njihova glavna odlika je mala težina, razmjerno veliki kotači s tankim gumama, te savijen volan prilagođen aerodinamičnom položaju tijela prilikom vožnje te samim time omogućavaju i postizanje najvećih brzina. Osim gore navedenih vrsta bicikala danas se na tržištu mogu naći i različiti modeli namijenjeni za akrobacije (BMX), za gradsku vožnju, razne varijante bicikala za terensku vožnju, te mnogi drugi. [6]



Slika 3. Cestovni bicikl

Bicikle možemo još dijeliti i prema drugim kriterijima, kao što su:

- broj osoba: najčešći su bicikli za jednu osobu, ali raširen je i tandem, bicikl za dvije osobe. Rjeđe se koriste bicikli za više od dvije osobe, ali je poznato da postoje zanimljive izvedbe bicikala za tri, četiri ili čak u nekim primjerima i više biciklista.
- broj prijenosnih omjera i vrsta mjenjača: velika većina bicikala je opremljena mjenjačem brzina, koji omogućava pravilne prijenose snage za različite uvjete vožnje kao što su nizbrdo, uzbrdo ili vožnja po ravnom. Postoje i bicikli sa samo jednim prijenosnim omjerom, bez mjenjača, a u takve spadaju BMX bicikli, dječji bicikli,

ali i bicikl za pistovna natjecanja. Mjenjači se također pojavljuju u različitim izvedbama, od mjenjača ugrađenih u glavčinu kotača pa do mjenjača s lančanicima i lancem koji prebacivanjem lanca između različitih prednjih i stražnjih lančanika mijenjanju prijenosni omjer.

- broj kotača: iako je najrašireniji standardni bicikl s dva kotača, često su korištene i trokolice (tricikli), posebno za potrebe prijevoza tereta ili kod dječjih bicikala. Izvedbe s više od tri kotača su rjeđe. [6]

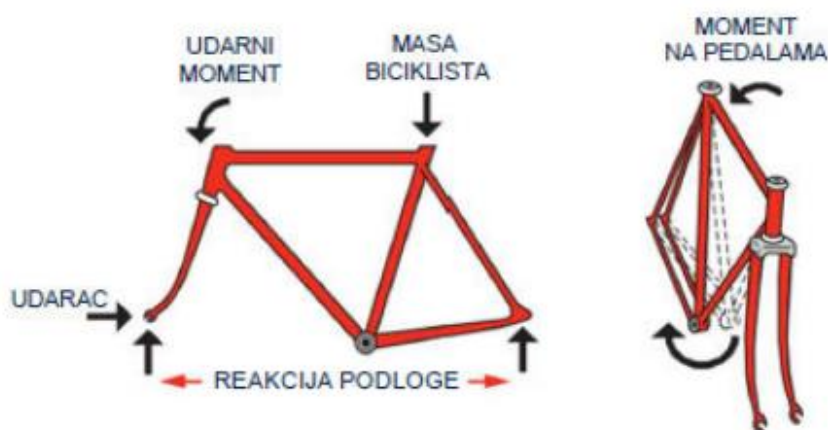


Slika 4. Tandem bicikl [7]

2.2. Konstrukcija okvira bicikla

Najvažnije svojstvo kod konstruiranja i izrade bicikla je njegova čvrstoća. Također je važna i krutost (otpornost na elastične deformacije i sigurnost od loma), ali i kriterij dizajna u pogledu aerodinamičnosti, stabilnosti i udobnosti. Uz čvrstoću i krutost glavni cilj je minimizirati masu masa uz što je moguće manju cijenu. Cijena ponekad nije presudan faktor pogotovo u profesionalnom biciklizmu. Za izradu okvira i vilice bicikla se najčešće upotrebljavaju okrugli presjeci cijevi i fiksne debljine stijenke, ali moguća je i primjena eliptičnog ili kvadratnog presjeka. Krutost se osigurava korištenjem cijevi većeg promjera, dok se primjenom tanjih stijenki cijevi smanjuje masa okvira bicikla. Što se tiče opterećenja, sam okvir je aksijalno, savojno i torzijski opterećen [Slika 5], dok je vilica najviše savojno i udarno opterećena. U uvjetima mirovanja tj. bez kretanja bicikla, vozač svojom masom radi opterećenje na cijev

sjedala i volana dok podloga djeluje suprotnom silom jednakog iznosa. U dinamičkim uvjetima, prilikom kretanja bicikla dolazi do pojave torzije uslijed pedaliranja te savijanja uslijed kočenja ili sudara. Javljaju se i vibracije koje uzrokuju pojavu promjenjivih sila koje okvir mora apsorbirati. Djelovanje svih sila i momenta okvir bicikla mora podnijeti bez plastičnih deformacija ili loma. [8,9,10,11]



Slika 5. Opterećenja koja djeluju na okvir bicikla [6]

2.3. Dijelovi bicikla

Glavni dijelovi bicikla su: okvir, pogon, sistem kočenja i sistem upravljanja.

U pogon spadaju pedale, zupčanici, lanac, mjenjači, ručice mjenjača i kotači koji prenose uloženu energiju vozača, preko pogonskog prijenosa zupčanika i lanaca na pogonski kotač u trenutku djelovanja vozača tlačnom silom na pedale. Kako bi se uspješno minimiziralo opterećenje vozača na pedale, tj. kako bi se vozač što manje umarao izumljen je prednji i zadnji mjenjač koji pomiče lanac po zupčanicima i smanjuje opterećenje pedaliranja. Mjenjač se pomiče ručno pomoću sajli, preko poluge na volanu i vozač si sam prilagođava potrebne brzine okretanja pedala. Kao i svako prijevozno sredstvo, bicikl ima funkcionalni sistem kočenja. Ima više različitih sustava kočenja, ali najčešći je sistem postavljanja prednje i zadnje kočnice na okvir bicikla. Kočnicama se također upravlja ručno pomoću kočne poluge na volanu čiji se rad prenosi sajlama na kočnice. Kočnice potom gumenim dijelom pritišću obroč kotača i usporavaju bicikl. Kako bi se osigurala željena kretnja biciklom, bitan je

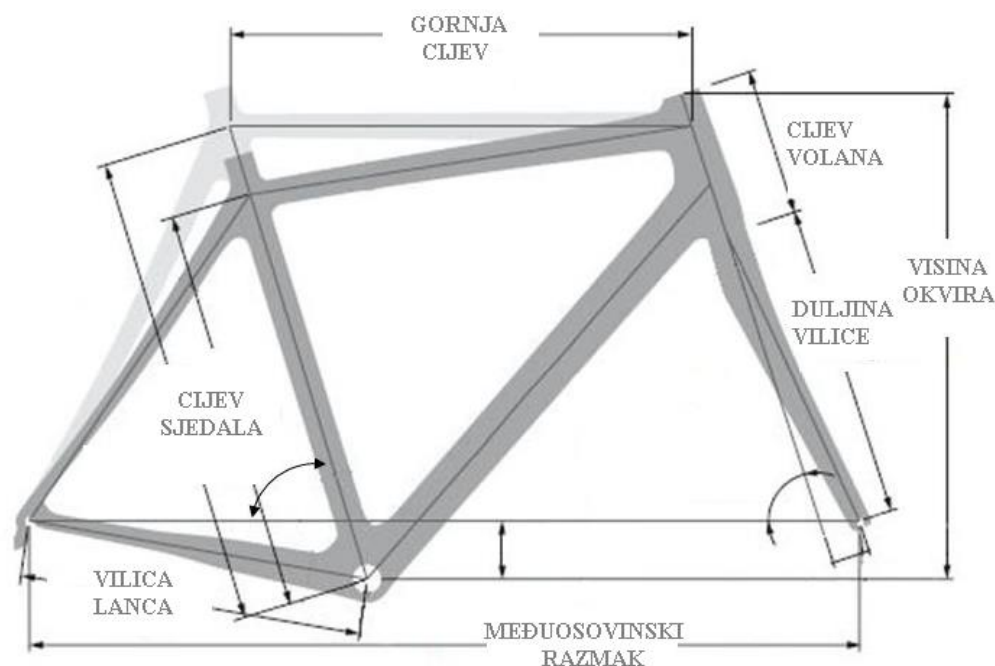
upravljački sustav. Upravljački sustav sastoji se od volana, lule volana, vilice, kotača i potrebnih ležajeva u spojevima između volana i vilice, kao i u glavčini kotača. Udobnost vožnje povećava se ugradnjom prednje i stražnje suspenzije. [9]



Slika 6. Dijelovi bicikla [12]

Okvir bicikla

Okvir je najbitniji dio bicikla jer se na okvir postavljaju sve druge komponente potrebne za sigurnu vožnju. Osnovni dijelovi okvira prikazani slikom su gornja cijev (eng. *top tube*) koja spaja cijev sjedala (eng. *seat tube*) s cijevi volana (eng. *head tube*) kroz se spajaju vilica i volan. Cijev sjedala proteže se od mjesta pogonske osovine prema sjedalu. Mjesto pogonske osovine spaja donju cijev (eng. *down tube*), cijev sjedala i vilicu lanca (eng. *chainstays*). Vilica lanca povezuje nosače kotača i mjesto pogonske osovine. Zadnja vilica ili vilica sjedala (eng. *seat stays*) povezuju cijev sjedala i nosač kotača dok nosač kotača povezuje vilicu lanca i vilicu sjedala. Mijenjanjem duljina osnovnih dijelova okvira, mijenja se geometrija definirana kutevima između cijevi i mijenja se način vožnje, tj, ponašanje bicikla u vožnji. Svaki vozač bicikla odabire veličinu okvira prilagođenu svojoj visini, tipu bicikla i stilu vožnje.



Slika 7. Dijelovi rame bicikla [13]

2.4. Materijali okvira bicikla

Izbor materijala okvira bicikla povezan je s izborom postupaka proizvodnje i konstrukcijskim oblikovanjem. To je vrlo složen proces čiji je konačni zadatak rješavanje problema usklađivanja svih zahtijeva, uz povećanje učinkovitosti svih postavljenih ciljeva (mala masa, niska cijena, izdržljivost). Okvir je osnovni dio svakog bicikla stoga je vrlo važno izabrati okvir od adekvatnog materijala. Glavne vrste materijala od kojih se danas izrađuju okviri su: čelik, aluminij, titan i kompoziti s ugljičnim vlaknima. Dijelovi poput lanca, sajli kočnica i ponekih vijaka su pretežno čelični zbog čvrstoće i trajnosti.

Čelični okvir bicikla

Čelični okviri se mogu pronaći na jeftinijim modelima bicikla dok se već za one u srednjem cjenovnom razredu više i ne koristi. Postoje i skupi čelični okviri koji svojom težinom ne odudaraju puno od aluminijevih. Ugljični čelici se koriste za masovnu proizvodnju, dok se niskolegirani čelici (čelici Cr-Mo i Mn-Mo) koriste za skuplje okvire. Potreban manji promjer cijevi rame, nego kod ostalih materijala zbog visoke čvrstoće i krutosti. Dobro apsorbiraju vibracije te su podložni korodiranju ako se ne održavaju ili ne zaštite. [14,15]

Tim studenata s tehničkog sveučilišta Delft u Nizozemskoj napravio je prvi okvir za bicikl od nehrđajućeg čelika tehnikom zavarivanjem uz pomoć 3D tiska. Za razliku od tradicionalnih 3D pisača, zahvaljujući robotskoj ruci, može izrađivati objekte od rastaljenog metala u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Proces počinje polaganjem grude rastaljenog metala na koju se nakon hlađenja dodaje druga gruda i tako se proces nastavlja, sve dok se ne dobije željeni oblik. Moguće je kontrolirati smjer u kojem će se stupac graditi, kao i povezivanje više stupaca. Nikakvi dodatni materijali nisu potrebni. Konačan proizvod nazvan je *Arc Bicycle* i teži koliko i tradicionalni bicikl čeličnog okvira te se bez problema može voziti po neravnim kamenim ulicama. [16]



Slika 8. Okvir bicikla od nehrđajućeg čelika [16]

Aluminijski okvir bicikla

Aluminij se ne koristi u čistom stanju zbog loših mehaničkih svojstava, nego se legira s manjim udjelom bakra, mangana, magnezija, silicija i cinka čime se znatno poboljšavaju mehanička svojstva. Za proizvodnju okvira bicikla najčešće se koristi aluminij legiran s magnezijem i silicijem i to legura aluminija 6061. Ima manju čvrstoću i gustoću, nego čelični okviri, ali pokazuje vrlo visoku krutost zbog toga su prilično otporni na udarce. Aluminijski okvir ne može korodirati, već stvara zaštitni oksidni sloj. Aluminijski okviri lakši su od čeličnih, no zato su i skuplji. [17, 18, 19, 20, 21, 22]



Slika 9. Aluminijski okvir [23]

Okvir bicikla od titana

Titan je jedan od najskupljih elemenata za izrađivanje okvira bicikla, no i jedan od najboljih. Kao i aluminij, titan se legira kako bi postigao bolja mehanička svojstva. Titanove legure su iznimno čvrste i otporne na koroziju. Okvir bicikla od titanove legure izdržljiviji je od čelične s težinom aluminijske. Koristi se na vrlo skupim biciklima (donja granica cijene je oko 9000 kn). Zbog visoke cijene titana i TIG postupka zavarivanja cijevi okvira bicikla, ovakvi okviri su iznimno skupi. Okviri bicikla ovog materijala okvire 50 % su manje mase, nego čelični okviri. [24]



Slika 10. Okvir bicikla od titanove legure [26]

Okvir bicikla od magnezija

Magnezijske legure imaju visoku čvrstoću i krutost s najmanjom gustoćom među svih tehničkim materijalima. Prilično se rijetko koriste prvenstveno zbog iznimno visoke cijene. Najzastupljenija legura je AZ61. Slabe su otpornost prema koroziji te imaju nizak modul elastičnosti. Prednosti magnezijskih legura su mala masa, dobro prigušenje vibracija, vrlo dobra livljivost i obradivost. [21, 24]



Slika 11. Prikaz okvira bicikla magnezijeve legure [26]

Okvir bicikla od kompozita s ugljičnim vlaknima

Kompozitna struktura napravljena od ugljičnih vlakana i epoksidne smole koristi se u svim područjima tehnike, pogotovo gdje se zahtjeva što manja masa konstrukcijskog elementa. Prednosti ovih okvira su mala gustoća, visoka čvrstoća i krutost. Nedostaci kompozita s ugljičnim vlaknima su visoka cijena, loša otpornost na udarce i sklonost oštećenjima. Vlakna se mogu oštetiti na mikroskopskoj razini pri jačim opterećenjima što nakon određenog vremena može dovesti do puknuća tog dijela okvira. Takva oštećenja ovog kompozita se vrlo teško popravljaju zbog skupe i zahtjevne obrade, ali je vrlo lagan i jednostavan za oblikovanje. [21, 24]



Slika 12. Okvir bicikla od ugljičnih vlakana [27]

2.4.1. Okvir bicikla - prirodni materijali

Sve se više razvija svijest korištenju prirodnih i recikliranih materijala u proizvodnji. Prirodni materijali imaju obnovljiv izvor energije te je njihova primjena sve popularnija. Kako bi se smanjilo djelovanje industrija i vozila na kvalitetu zraka sve se više razvijaju ekološki prihvatljivije tehnologije, usmjerava se na smanjenje potrošnje energenata i očuvanje prirode. Tako su prirodni i reciklirani materijali našli svoje mjesto u biciklističkoj industriji.

Bicikl s drvenim okvirom

Drvo je obnovljiv, biorazgradiv i recikličan materijal. Kroz povijest se javljao kao tehnički materijal koji je vrlo dobro zamjenjivao metalne materijale. Niske je gustoće i vrlo lake obradivosti te se često primjenjuje u građevinarstvu, brodogradnji, proizvodnji vozila poljoprivredi. Kao sirovina služi za proizvodnju papira i celuloze, a recikliranje papira nije toliko isplativo zbog velike potrošnje vode i uložene energije. Drvo zbog svoje građe nije homogen materijal što se može primijetiti iz strukture koja je vlaknasta, a pretežno se sastoji od celuloze, lignina i smola. Čvrstoća drva ovisi o smjeru vlakana i udjelu vlage, a najviše o presjeku stabla koji može biti radijalan, tangencijalan i poprečan. Najveća opterećenja podnosi u smjeru vlakana. Rastezanje i skupljanje drveta ovisi o vlažnosti okoline u kojoj se nalazi. Osim nedostataka homogenosti i utjecaja vlage, drvo je zapaljivo i kod okvira bicikla

nije poželjno ponajprije zbog velike mase okvira bicikla. Proizvodnja okvira od drveta [Slika 13] je kompleksna proizvodnja i puno vremena bi se moralo uložiti kako bi se lakše savinulo i time dobilo željene oblike i dijelove bicikla. Okvir se proizvodi tradicionalnom japanskom metodom tako da se drvo najprije izlaže visokoj temperaturi, a zatim se potapa u vodu i u odgovarajućem se kalupu suši 12 sati i na kraju lakira. [28]



Slika 13. Bicikl s drvenim okvirom [28]

Bicikl od kartona

Kartonski bicikl je bicikl sastavljen uglavnom ili u cijelosti od kartona. Izrađeni su samo prototipovi od 2012. godine. Prednosti takvih bicikala je niska cijena i konstrukcija od recikliranih i obnovljivih materijala. Godine 2008. Phil Bridge je izradio kartonski bicikl u sklopu trogodišnjeg studija na dizajnu proizvoda na Sveučilištu Sheffield Hallam. Namjeravao je suzbiti krađu bicikala zbog dijelova. Može podnijeti vozača do 77 kilograma i konstruiran je iz konstrukcijskog kartona Hexacomb. Vodonepropusan je, ali su očekivanja da okvir izdrži samo šest mjeseci konstantne uporabe. Lanac i kočnice su metalni, kao i kod konvencionalnog bicikla, a pokreće se na standardnim pneumatskim gumama. Godine 2012. Izhar Gafni, izraelski inženjer strojarstva i entuzijasta za biciklizam predstavio je prototip bicikl koji je gotovo u cijelosti iz kartona. Komponente, uključujući okvir, kotače, upravljač i sjedalo, sastoje se od listova presavijene i lijepljene kartonske ploče. Kompletni bicikl teži 9.1 kg i tretira se kao vatrootporan i voodootporan. Može podinjeti vozače do 220 kilograma. Ima čvrste pneumatske gume izrađene od reciklirane automobilske gume. Snaga se prenosi s pedala na stražnji kotač pomoću remena, također izrađenim od reciklirane gume. Planira se

masovna proizvodnja ovog bicikla po cijeni od 20 USD. Ciljno tržište su slabo razvijene zemlje. [29, 30]



Slika 14. Bicikl od kartona a) Philea Bridgea [31] i b) Izhara Gafnia [32]

Okvir bicikla proizveden od baltičke breze

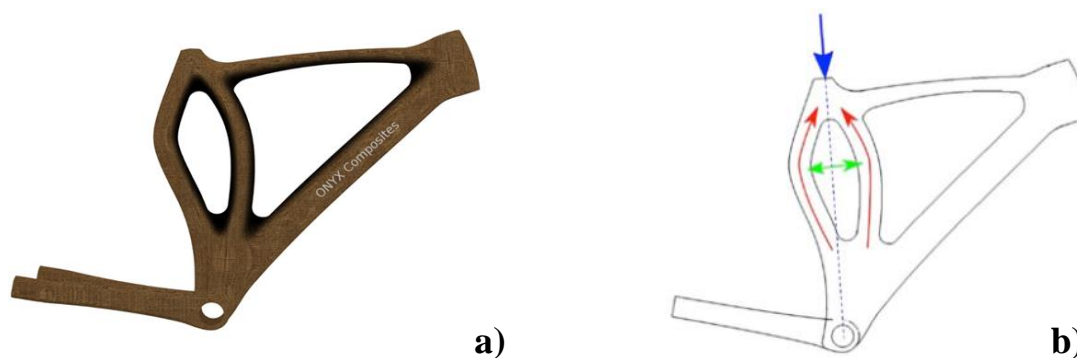
Enzo Esposito osmislio je ovaj bicikl pomoću BikeCAD-a, a zatim je izradio okvir od baltičke breze. Okvir nije u potpunosti ispunjen, već sadrži šupljine u nekritičnim mjestima opterećenja, dok su u područjima s velikim naprezanjem, poput cijevi upravljača i vilice bicikla, oblikovane i ugrađene posebne čelične komponente. [33]



Slika 15. Okvir bicikla od baltičke breze [33]

Okvir bicikla od konoplje

Bicikl od konoplje je dizajniran i razvijen u uskoj suradnji s Nicolasom Meyerom iz tvrtke Onyx Composites. Cilj im je bio dokazati da prirodna vlakna mogu biti alternativa sintetičkim vlaknima poput staklenih vlakana ili ugljičnih vlakana. Proces proizvodnje za staklena i ugljična vlakna zahtijeva puno energije zbog procesa koji zahtjeva vrlo visoke temperature. Te sirovine nisu obnovljive i zahtijevaju puno vremena kako bi nastale. Vlakna konoplje imaju čvrstoću i rastezljivosti usporedivu sa sintetičkim vlaknima, ali su znatno manje tlačne čvrstoće. Zbog tog nedostatka oblikovali su okvir koji je pretvorio tlačnu silu u vlačnu, uvođenjem napetog štapa unutar okvira. Napeti štap pretvara tlačnu silu od težine vozača na sjedalo u vlačne sile i također djeluje kao ugrađeni ovjes. Time su nedostatak materijala iskoristili za integraciju novih funkcija u oblik okvira bicikla. Prema njihovim mjerenjima vlačna čvrstoća njihovog okvira je 310 – 390 MPa uz krutost od 69 GPa što je približno jednako aluminijskim okvirima (vlačna čvrstoća 350 – 390 MPa, krutost 70 GPa). Da bi se dokazalo da je okvir bicikla ne samo ekološki održiv, nego i vrlo izdržljiv, Nicolas Meyer se natjecao u nekoliko triatlona na biciklu proizvedenom od konoplje. Biciklisti i bicikli testirani su negativno na testu droge. Na slici 16 a) je prikazan okvir bicikla od konoplje, a na b) naprezanja koja se javljaju u okviru bicikla. [34]



Slika 16. Okvir bicikla od konoplje a) i b) naprezanja u okviru [35]

Okvir bicikla od bambusa

Potencijal bambusa za izradu okvira bicikla otkriven je krajem 19. stoljeća u Velikoj Britaniji, no rasla je popularnost čeličnih, a kasnije i aluminijskih okvira stoga je bambus zaboravljen kao materijal za okvir bicikla. Okvire od bambusa danas proizvode tvrtke kao što Bambooride, BME Design, Ozon Bikes, Craig Calfee Designs i Panda Bikes. S obzirom na svojstva i karakteristike bambusa, prvenstveno što je brzo rastuća biljka i prirodan, obnovljiv materijal bambus može se primjenjivati u proizvodnji okvira umjesto tradicionalnih materijala. Prema istraživanjima bambus bicikli pokazali su izvanredna svojstva kao što su vrlo dobro prigušenje vibracija i dobra krutost, zadržavajući malu masu te su vrlo udobni za vožnju. [36]



Slika 17. Okvir bicikla od bambusa [37]

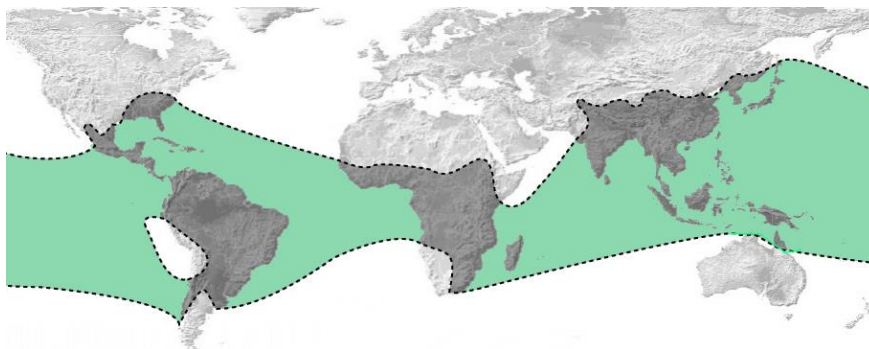
3. BAMBUS

Bambus je rod biljaka koje pripadaju porodici trava (Poaceae). Potječe iz Indije, a proteže se od tropskih i suptropskih predjela, sve do visokih nadmorskih visina u planinama (Himalaja), no poznato je da mnoge vrste bambusa mogu živjeti u gotovo svim klimatskim zonama. Pretežno raste u tropskim područjima južne, jugoistočne i istočne Azije i sjeverne Australije, a mnoge vrste rastu i na području sjeverne i južne Amerike. Bambus ima šuplju drvenastu stabljiku razdijeljenu člancima koja naraste do 30 m. Cvate vrlo rijetko (neke vrste 30-120 godina). U zemljama Dalekog istoka svakodnevni je život nezamisliv bez bambusa. Bambus je osnovni građevni material od kojega se rade kuće, brodovi, mostovi, namještaj, muzički instrumenti, kao sirovina za proizvodnju vina i goriva, kao materijal za izradu odjeće i obuće, oružja, mostova, cjevovoda te za proizvodnju papira. Pupoljci bambusa koriste se i u prehrani, a neke vrste npr. U Europi se bambus koristi već dugi niz godina kao vrtna biljka zbog raznolikosti vrsta i njegovih osobina. U početku su se koristile samo vrste roda *Fargesia* i *Pseudosasa* no danas se u hortikulturi koriste brojne vrste ovisno o namjeni. U prošlosti se mislilo da bambus spada u vrlo primitivne biljke, primitivnije od trava, no DNK analizom došlo se do spoznaja da je bambus evolucijski najrazvijenija biljka na svijetu i ispitivanjima su napravljene osnovne podjele bambusovih vrsta. [38, 39]



Slika 18. Stabljike bambusa [40]

Bambus se u Kini rabi već 5000 godina. Zbog njegove svestrane i sveprisutne primjene istočnoazijska se civilizacija često naziva bambus – civilizacija. Područja Kine koja zahvaćaju istočne i južne krajeve Azije i gdje djeluje monsunska klima imaju oko 500 vrsta, zbog čega su proglašena Kraljevstvom bambusa. [41]



Slika 19. Područja rasta bambusa u svijetu [42]

3.1. Struktura bambusa i kemijski sastav

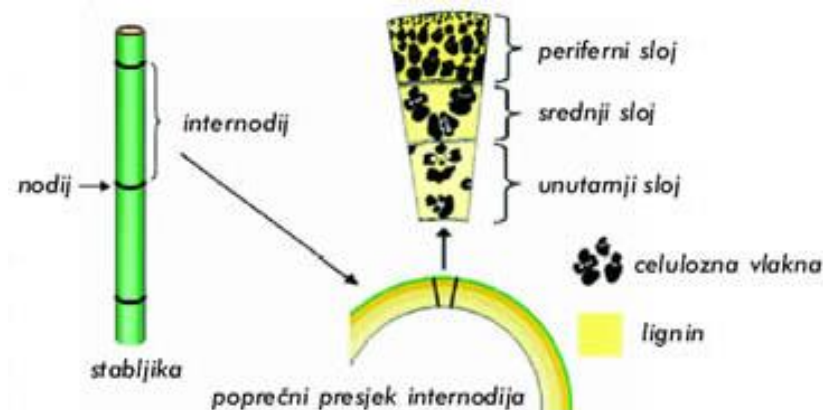
Bambus ima šuplju cilindričnu stijenku koja je podijeljena čvorovima. Čvorovi daju bambusu čvrstoću. Ima veliki iznos čvrstoće u smjeru vlakana, a mali iznos okomito na smjer vlakana. Stabljike bambusa su duge i razgranate, drvenaste i čvrste, bez srčike, bez godova i bez kore. Stabljike su zelene, a kako dozrijevaju i ovisno o vrsti, mijenjaju boju i postaju žute, narančaste, crvene, smeđe ili crne. Stabljike nakon 4 - 12 godina postižu punu zrelost i umiru, ali iz zemlje svako proljeće izbijaju nove, mlade biljke. Listovi su mekani i nježni pa ih u hladnim područjima mogu oštetiti niske temperature i mraz. [43]



Slika 20. Cilindrična šuplja stapka bambusa [44]

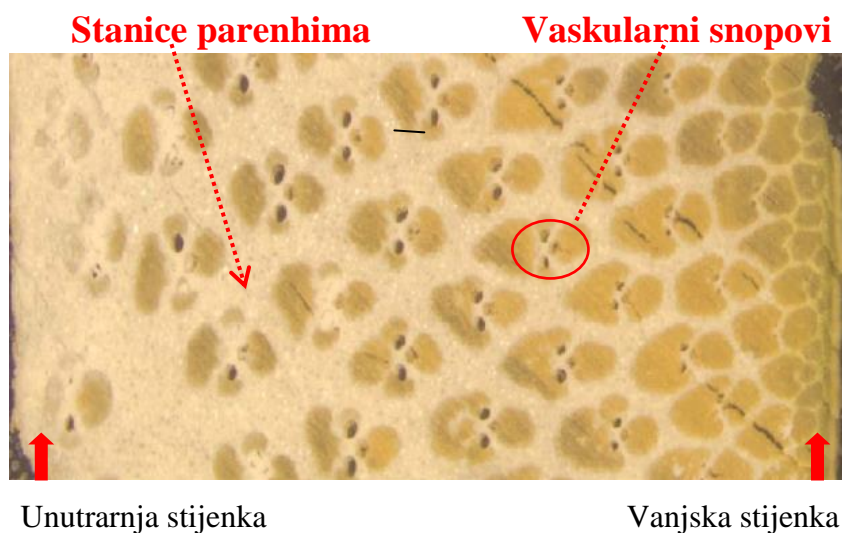
Bambus star 5 do 9 godina prikladan je za industrijsku preradu. Šuplja stabljika bambusa ima stijenke debljine oko 2,5 cm, a njena se tvrdoća smanjuje od vanjske površine prema unutrašnjosti. Svaka stabljika već pri izbijanju iz tla ima konačan broj članaka (nodija), a rast se odvija produljivanjem tzv. internodija, dijelova stabljike između članaka [Slika 21].

Nakon što stabljika dosegne punu visinu, počinje postupno osržavanje ili odrvenjivanje, koje traje 4 – 5 godina. Bioaktivnosti i sadržaj vode tada se smanjuju, povećava se količina suhe tvari i zadebljavaju stijenke stanica. [41]



Slika 21. Shematski prikaz građe bambusa [41]

Stabljika se sastoji od 50% stanica parenhima (ksilem), 40% vlakana i 10 % vaskularnih snopova. Po poprečnom presjeku stabljike, udio vlakana povećava se prema vanjskom dijelu stijenke [Slika 22], dok se postotak stanica parenhima smanjuje. Vlakna doprinose 60-70% težine ukupnog tkiva. [45, 46]

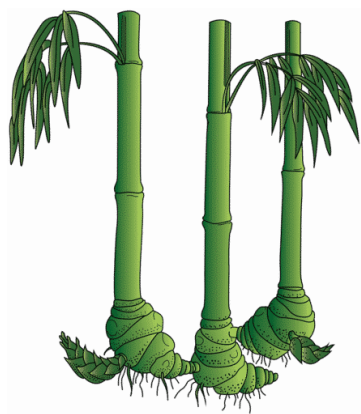


Slika 22. Poprečni presjek internodija [47]

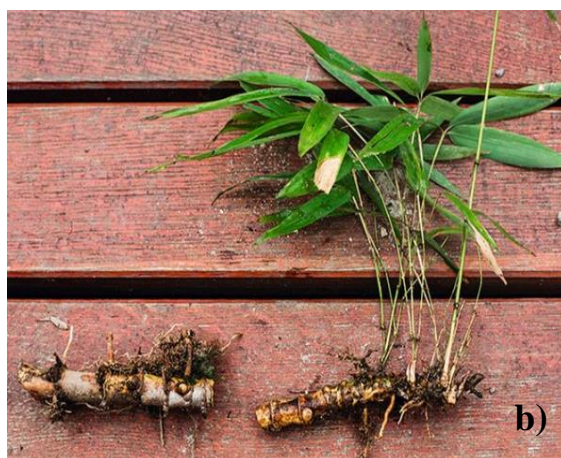
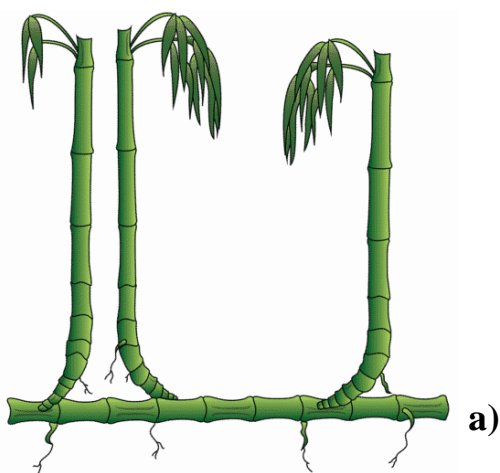
Bambusi se osim stabljike sastoje i od rizoma, korijena, lišća, grana i pupova. Rizom je usađen plitko u zemlju, predstavlja temelj bambusa, raste okomito na vanjski dio stabljike i na njega se nastavlja korijenje. Rizomi čine rezervoare koji osiguravaju hranu za nadzemni

izdanak i preživljavanje biljke u nepovoljnim uvjetima, ali služe i za vegetativno razmnožavanje biljke te bambusu daje stabilnost i krutost. [45, 46]

Dva osnovna tipa rizoma su: grupirani i uzastopni. Grupirani rizomi prepoznatljivi su po nekoliko većih podzemnih pupoljaka iz koji rastu stabljike bambusa. Sastoje od vrata rizoma i izdanka rizoma. Bambusi koji imaju grupirani tip rizoma nazivaju se grupirani bambusi (eng. Clumping bamboos), prikazani na slici 23. Uzastopni rizomi su prepoznatljivi po sličnom izgledu kao i sama biljka jer su dugi, šuplji i cilindrični. Smjer širenja ove vrste rizoma je okomit na biljku čime se stvara mreža rizoma iz kojih rastu stabljike. Bambusi s ovakvim rizomima nazivaju se bambusi trkači (eng. Running bamboos) zbog svog intenzivnog širenja. [48]



Slika 23. Prikaz grupiranog rizioma bambusa [48]



Slika 24. Prikaz uzastopnog rizioma bambusa a) [48] i b) [49]

Kemijski sastav bambusa je sličan onome u drvu. Bambus je izgrađen od 50-70% celuloze, 20-30% hemiceluloze i 20-30% lignina, ovisno o vrsti. Ostali konstituenti su proteini, masti, pektin, tanin, pigmenti i pepeo. Celuloza je linearni polimer, spada u ugljikohidrate polisaharide u kojima vlada kovalentna veza među molekulama što uzorkuje veliku otpornost na vlačnu čvrstoću. Hemiceluloza je prisutna skoro u cijeloj stijenki zajedno s celulozom. Lignin je integrirani dio stanične stijenke bambusa. Popunjava prostora između celuloze, hemiceluloze i pektina te predaje čvrstoću stijenki bambusa. Drugi je najzastupljeniji organski spoj na Zemlji, poslije celuloze te je iznimno hidrofoban. Pektin je heterosaharid koji se nalazi u staničnoj stijenki. Duljina, složenost i redoslijed lanaca jedinica je raznolik kod pektina. U usporedbi s drvetom, bambus ima više alkalnih ekstrakata, pepela i sadrži silicijev dioksid. Rezultati istraživanja pokazali su da se hemicelulozni sadržaj ne razlikuje među različitim dobima bambusa, dok se lignin, ekstrakti, pepeo i silicijevog dioksida povećao starenjem bambusa, a udio celuloze smanjio. Bambus sadrži i drugi organski sastav osim celuloze i lignina. Sadrži oko 2-6% škrob, 2% deoksidiranog saharida, 2-4% masti i 0,8-6% proteina. Sadržaj ugljikohidrata bambusa igra važnu ulogu u njegovom vijeku trajanja. Trajnost bambusa protiv napada plijesni i gljivica je izravno povezana s kemijskim sastavom. Prirodna trajnost bambusa varira između 1 i 36 mjeseci, ovisno o vrsti bambusa i klimatskim uvjetima. Prisutnost velikih količina škroba čini bambus vrlo osjetljiv na plijesni i gljivica. Sadržaj pepela kod bambusa dolazi od anorganskih minerala, prvenstveno silicija, kalcija i kalija. Sadržaj silicija je najviši u epidermisu, vrlo malo u čvorovima, a odsutan je u internodiju. Veći sadržaj pepela u nekim vrstama bambusa može nepovoljno utjecati na strojeve za obradu bambusa. [50, 51]

3.2. Osnovna podijela bambusa

Glavna podijela bambusa je na 3 skupine:

- Olyreae (travnati bambus)
- Arundinarieae (umjereni drvenasti bambus)
- Bambuseae (tropski drvenasti bambus)

Bambusi iz porodice Olyreae imaju slabo razvijene rizome te biljka ne može postići krutost stapke i ne sadrži listove na stabljici. Porodice Olyreae sastoji se od 22 roda i 124 podvrste te raste na području južne i srednje Amerike. Kod porodica Arundinarieae rizomi su dobro

razvijeni, neke vrste imaju korijen koji se ne grana dok većina ima korijen koji se grana. Stabljika im je šuplja i razgranata s po jednom jednu granom na čvoru. Neke vrste iz ove porodice su Arundinaria, Bashania, Bergbambos, Ferrocalamus, Himalayacalamus, Indocalamus, Indosasa, , Oldeania, Oligostachyum, Phyllosasa. Kod Bambuseae rizomi su dobro razvijeni te uglavnom imaju korijen koji se ne grana i imaju jednu granu po čvoru. [45]

Glavne gospodarske vrste bambusa uključuju sljedeće:

- *Dendrocalamus strictus* potiče iz Indije. Veliki nasadi su od najveće gospodarske važnosti u Indiji, gdje se samo 10 od 100 vrsta bambusa komercijalno iskorištava. Koristi se uglavnom za izradu papira i gradnju.
- *Dendrocalamus asper* - smatra se da mu je prirodno stanište na Tajlandu. Tajland namjerava širiti biljke ove vrste, budući da većina prisutnih jestivih puževa iskorištava bambus za hranu.
- *Thyrsostachys siamensis* – potiče s Tajlanda. Koristi se za izgradnju u ruralnim i urbanim područjima također uzgoja se za jelo zbog jestivih pupoljaka.
- *Phyllostachys pubescens* - ponekad opisan kao *Phyllostachys edulis*. Potiče iz Kine i zauzima 20.000 km² ili 60% ukupne površine šuma bambusa. U Japan je uvezen oko 1750 godine. Ova vrsta je poželjna diljem jugoistočne Azije zbog svojih jestivih pupoljaka. Zahtijeva klimu srednje minimalne temperature koja nije niža od zamrzavanja. Najprofitabilnija je vrsta bambusa u Kini i donosi godišnju zaradu od 2,6 milijardi eura.
- *Phyllostachys bambusoides* - potječe iz Kine, ali intenzivno se uzgaja u Japanu od 1866. godine. Najveći i najprofitabilniji od ovog roda nakon *Phyllostachys pubescens*, jer se od njega proizvode podne obloge, zbog svoje čvrstoće i temperaturne stabilnosti.
- *Dendrocalamus giganteus* je najveći poznati bambus na svijetu. Raste do visine 40 m i 30 cm u promjeru. Zbog sve veličine korišteni su u gradnji
- *Phyllostachys nigra*, sorte Henon - raste do maksimalne visine od 20 m s promjerom od 11 cm. Ima guste tamnozelene listove i sivu voštanu boju koja čini ovu vrstu upečatljivom. Također ima ravnu vrstu stabljiku koja ga čine korisnim u građevinske svrhe. Koristili se u tradicionalnoj kineskoj medicini kao lijek kod bubrežnih oboljenja

ili sredstvo protiv bolova. Vrlo je važan i za prehranu panda (*Ailuropoda melanoleuca*) koji pojedu i do 12 kg bambusovih mladih pupoljaka dnevno te bez bambusa ne bi bio moguć opstanak te vrste.

- *Arundinacea* raste na području južne Azije i vrlo je krute građe. Primjenjuje se u raznim namjenama. Za njih su karakteristični debeli čvorovi koji otežavaju razdvajanje.
- *Arundinaria amabilis* ili Tonkinov bambus koristi se za proizvodnju visokokvalitetnih štapova za pecanje i skijaških štapova u Europi i sjevernoj Americi. Uzgoj je ograničen na jugozapad Guangdong provincije u Kini. [53, 53]

3.3. Mehanička svojstva bambusa

Mehanička svojstva materijala, kao i ostala svojstva, posljedica su strukturnog stanja materijala. Zauzimaju istaknuto mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima jer se temeljem njih dimenzioniraju dijelovi konstrukcija. Mehanička svojstva bambusa određuju svojstva i udio vlakana u matrici. Bambus je prirodni kompozitni materijal. Kao i kod ostalih kompozitnih materijala, udio vlakana i njihov raspored predstavljaju najbitniji faktor. Vlakna su osnovni nosivi element kompozita i daju mu čvrstoću, dok matrica drži vlakna zajedno i ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na vlakna. Bliže vanjskom dijelu stijenke gustoća vlakana je veća, nego prema unutrašnjosti. Bambus kao kompozit zbog takve građe ima nejednolika mehanička svojstva, a najviša u smjeru vlakana i uz vanjsku stijenku.

Bambus je kompleksan materijal, a faktori koji utječu na njegova konačna svojstva su:

- 1) Smjer vlakana - sva bambusova vlakna prate smjer rasta bambusa. Mehanička svojstva ovise o smjeru sile opterećenja. Tlačenje bambusa u aksijalnom smjeru rezultirat će manjom čvrstoćom, nego djelovanje te sile u radijalnom smjeru.
- 2) Postotak vlage - suhi bambus ima veća mehanička svojstva od mokrog bambusa. Sirovi bambus ima najviši postotak vlage.
- 3) Promjer stapke - bambus manjeg promjera ima bolja mehanička svojstva gledajući njegovu veličinu promjera. Međutim, Bambus većeg promjera može izdržati veća opterećenja.
- 4) Debljina stijenke - bambusi s debljom stijenkom imaju bolja mehanička svojstva od bambusa istog promjera, ali tanje stijenke.

- 5) Udaljenost čvorova - kako se udaljenost između čvorova smanjuje, mehanička svojstva se poboljšavaju.
- 6) Mjesto reza po visini - dio bambusa bliže dnu stabljike ima bolja mehanička svojstva.
- 7) Starost stabljike prilikom rezidbe - vrlo mladi bambusi i stari bambusi imaju slabija mehanička svojstva od bambusa koji odrezan u dobi od 3-7 godina.
- 8) Vrsta bambusa - zbog velike raznolikosti vrsta bambusa i njihovih karakteristika, neke nisu iskoristive u konstrukcijske svrhe. [54, 55, 56]

Osim faktora koji utječu na svojstva materijala za odabir konstrukcijskog materijala najbitnija su njegova mehanička svojstva. Mehaničko svojstvo materijala predstavlja mjerljivu veličinu, koja se može brojčano odrediti pomoću normiranih metoda ispitivanja. Bambus je najčešće opterećen tlačno i savojno, mora biti visoke žilavosti kako bi bio otporan na krhki lom, zadovoljavajuće tvrdoće i male gustoće zbog smanjenja mase konstrukcije. Pošto je izložen vremenskim uvjetima i podložan upijanju vlage, bitan podatak je i postotak vlage u bambusu.

3.3.1. Dosadašnja istraživanja mehaničkih svojstava

Tablica 1. Prikaz dosadašnjih istraživanja svojstava bambusa

IZVOR	PROVEDENA ISPITIVANJA	REZULTATI ISPITIVANJA
[57]	- vlačna čvrstoća - modul elastičnosti - savojna čvrstoća	- najveća vlačna naprezanja do 400 N/mm ²
[58]	Calcutta bambus - modul elastičnosti -vlačna čvrstoća -savijanje -utjecaj vlage	-izloženost temperaturi 20°C i relativnoj vlažnosti 65% u trajanju od 3 tjedna - prosječna vlažnost uzorka 9,4 % - savojna čvrstoća: 137 – 148 N/mm ²
[59]	Kao Zhu, Mao Zhu - modul elastičnosti - tlačna čvrstoća - savojne čvrstoće - vlažna komora	- modul elastičnosti, tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, gustoća: Kao Zhu: 4000 – 12000 N/mm ² , 103 N/mm ² , 109 N/mm ² , 798,8 kg/m ³ Mao Zhu: 5000 – 10000 N/mm ² , 134 N/mm ² , 85 N/mm ² , 793,9 kg/m ³ - Kao Zhu s povećanjem udjela vlage za 15 % smanjuje se čvrstoća za 50 % i krutost za oko 20% - Mao Zhu bambus s povećanjem udjela vlage za 25%, čvrstoća i krutost se smanjuju za oko 30%
[60]	- usporedba tlačne čvrstoće -proučavanje promjera -usporedba gustoće vlakana	- tlačna čvrstoća Kao Zhu: 37,72 – 61,97 N/mm ² Mao Zhu: 47,03 – 62,77 N/mm ² Bambus pervariabilis - Kao Zhu Phyllostachya Pubescens - Mao Zhu
[51]	- udio vlage -djelovanje temperature	-promjenom udjela vlage za 1%: - modul elastičnosti bambusa mijenja se za 2 % - savojna čvrstoća bambusa mijenja se za 5 % - 10 min pri 200°C bambus izgubi 7,5% mase zbog smanjenja udjela vlage

[61]	<ul style="list-style-type: none"> - modul elastičnosti - tlačna čvrstoća - vlačna čvrstoća - savojna čvrstoća 	<ul style="list-style-type: none"> - najviši iznos vlačne čvrstoće bambusa iznosio je 315 N/mm² - tlačna čvrstoća: 99 – 129 N/mm² - savojna čvrstoća: 4,3 – 4,4 N/mm²
[62]	Phyllostachis dulcis - tvrdoća	- tvrdoća: 380 – 530 N/mm ²
[55]	- vlačna čvrstoća	- vlačna čvrstoća: 85 - 231 N/mm ²
[63]	usporedba: - vlačna čvrstoća - modul elastičnosti - gustoća	<ul style="list-style-type: none"> - kompozit s 30% bambus vlakana u polipropilenskoj matrici: - vlačna čvrstoća: 25,80 N/mm² - kompozit s 30% bambus vlakana i matricom polietilena visoke gustoće: - vlačnu čvrstoću 25,47 N/mm² - bambus vlakna: - vlačna čvrstoća 500-575 N/mm² - gustoća 1200– 1500 kg/m³
[64]	usporedba: bambus, čelik, drvo - tlačna čvrstoća - vlačna čvrstoća - savojne čvrstoće - smično naprezanje	<ul style="list-style-type: none"> - vlačna čvrstoća: - bambus: 197 – 286 N/mm² - drvo: 78 – 145 N/mm² - tlačna čvrstoća: - bambus: 36 – 65 N/mm² - drvo: 33 – 58 N/mm²
[65]	usporedba: neobrađenog laminiranog i prešanog bambusa - tlačna čvrstoća - vlačna čvrstoća - smično naprezanje	<ul style="list-style-type: none"> - vlačna čvrstoća, tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća - neobrađenog: 153 N/mm², 53 N/mm², 135 N/mm² - laminiranog: 90 N/mm², 77 N/mm², 83 N/mm² - prešanog: 120 N/mm², 86 N/mm², 119 N/mm²

[66]	laminirani Moso bambus - smično naprezanje - savijanje	- savojna čvrstoća: 76 - 79 N/mm ² - gustoća: 644 kg/m ³
[67]	Ispitivanje vlačne čvrstoće bambusa i ugljičnog čelika	- vlačna čvrstoća: - bambusa 31 - 94 N/mm ² - čelika 290 – 508 N/mm ²
[68]	Tonkin i Ku Zhu - vlačna čvrstoća - tlačna čvrstoća - savojna čvrstoća - izvijanje - tvrdoća - udio vlage	- vlačna čvrstoća Tonkin- suhi: 210,40 N/mm ² vlažan: 172,65 N/mm ² Ku Zhu- suhi: 193,58N/mm ² vlažan: 155,34 N/mm ² - izvijanje – Tonkin: 48,00 N/mm ² - tvrdoća – Tonkin: 32,42 N/mm ² Ku Zhu: 26,02 N/mm ²

3.4. Bambus - svestran prirodni resurs

Bambus je jedna od najbrže rastućih biljaka na svijetu. U Japanu je zabilježen rekord od 131 centimetar za 24 sata. Kada se reže, bambus može ponovo narasti i oporaviti se u roku godine dana jer se pritom ne ošteti sama biljka, a neke vrste rastu 120 cm dnevno. Ne mora gnojiti kako bi brže i bolje rastao te je prirodno otporan na štetočine. Te karakteristike razlikuju ga u odnosu na pamuk ili drvo, koje treba ponovo posaditi pri svakoj žetvi i zahtijevaju dosta tretiranja kemikalijama i navodnjavanja za postizanje optimalnog rasta. Bambus je 100% prirodan i biorazgradiv. Apsorbira više ugljičnog dioksida iz zraka, nego pamuk ili drvo. Oslobađa više kisika, nego iste površine pod drvećem te time pospješuje kvalitetu zraka. Povećava biomasu na 30% godišnje u odnosu na 2-3% za drvo. Sadrži više celuloze nego prosječno drvo. Poboljšava i plodi tlo, smanjuje zbijanje i otvrdnjavanje tla. Pojavljuje se u 600 vrsta i 13 rodova, pokriva 29 milijuna ha šume. Daje prinos od 150.000 tona bambusa godišnje, a potencijal je oko 400.000 tona. U tom sektoru zaposleno je 100 milijuna ljudi i proizvodi vrijednost 1,5 milijardi USD godišnje. Povećana istraživanja tijekom godina znatno su pridonijeli razumijevanju bambusa, kao i poboljšane tehnologije obrade za širu uporabu.

Najznačajnija primjena je u Aziji, kao hrana, sirovina za proizvodnju goriva, materijal za izradu odjeće i obuće, papira, oružja, mostova, cjevovoda i kuća. U Europi i Sjevernoj Americi korištenje bambusa ograničeno je na primjenu građevinskog materijal. Mnoge azijske vrste bambusa imaju jake, lagane i fleksibilne drvenaste stabljike koje se mogu primijeniti kao građevinski materijal. Jedna od najznačajnijih suvremenih uporaba bambusa su privremene skele. [69, 70]



Slika 25. Skela od bambusa [71]

Proizvodi od bambusa podijeljeni su u sljedeće kategorije: [72]

- Građevinska i armirana vlakna - to su poljoprivredni i ribarski alati, glazbeni instrumenti, namještaj, inženjerske građevine: mostovi, skele, kuće (zidovi, okviri za prozore, krovovi).
- Papir i karton - (šperploče, laminirani podovi). Bambusova vlakna su relativno duga i stoga su idealna za proizvodnju papira i kartona. Proizvodnja papira u Kini počela je prije 2000 godina, dok se u Indiji, 2,2 milijuna tona bambusa godišnje obrađuje u pulpu, što čini oko dvije trećine ukupne proizvodnje celuloze.
- Hrana - bambusovi pupoljci brojnih vrsta su poznata osobina kineske i druge azijske kuhinje. Izvoz iz Tajvana vrijedan je 50 milijuna dolara godišnje, a oni iz Tajlanda 30 milijuna dolara, s tim da veliki dio toga zadovoljava potrebe Japana.
- Bambusova vlakna – služe u tekstilnoj industriji za proizvodnju posteljine, donjeg rublja i ručnika. Bambusova vlakna se miješaju s drugim vlaknima poput pamuka ili poliestera kako bi se postigla željena svojstva. [72]

Postoji više od 1500 komercijalnih primjena. Primarni tehnološki zadatak u primjeni bambusovine kao drvnog supstituenta je mehanička pretvorba iz šupljeg, cjevastog oblika u oblik pune masivne ploče. Od pločastih oblika moguće je dobiti različite proizvode: višeslojne ploče, parket, obloge, letve, trake, pa čak i furnir. Proizvođači podova i šperploče od bambusa rukuju s potencijalno toksičnim kemikalijama, uključujući veziva i lakove. Proizvode dosta čvrstog otpada i rade s opremom koja emitira opasne plinove. Odgovornost proizvođača u suočavanju s ovim potencijalnim ekološkim i zdravstvenim opasnostima još nije kvalitetno definirana. Većina proizvođača ne vodi računa o ekološkim posljedicama proizvodnje. [41, 70, 73] Još jedna neobična primjena je proizvodnja kaciga za motocikle koje je projektirao French Company Roof, prikazana na slici 26. To je prvi okvir kacige od bambusa, koji je uspješno prošao sigurnosne zahtjeve i certifikate. [74]



Slika 26. Kaciga za motocikl napravljena od bambusa[74]

Proizvod koji je razvila japanska tvrtka Mitsubishi je prototip vrata automobila izrađen od bambusovog kompozitnog materijala kako bi se smanjili troškovi proizvodnje materijala koji se trenutno koriste i djelovali na smanjenje štetnih plinova koji se u proizvodnji ispuštaju u zrak. Taj materijal nije primarni izbor u automobilske industriji zbog prednosti u mehaničkim svojstvima drugih kompozita, ali se pokazuje kao dobra alternativa koja spaja tehnologiju i prirodu. [63]



Slika 27. Prototip vrata izrađen od bambusovog kompozitnog materijala[63]

4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

U eksperimentalnom dijelu rada ispitati će se mehanička svojstva Tonkin Cane bambusa različitog vremena izloženosti uvjetima u vlažnoj komori. Uzorci će biti podijeljeni u 4 skupine, gdje će jedna skupina biti suhi uzorci tj. uzorci koji nisu bili u vlažnoj komori, a ostale 3 skupine će u vlažnoj komori biti 1, 5 i 10 dana. Ispitivanja koja će se provesti su izvijanje, udarni rad loma i tvrdoća bambusovih stapki s ciljem usporedbe promjene mehaničkih svojstava bambusa različitih udjela vlažnosti i mogućnošću korištenja Tokin Cane bambusa pri izradi bicikla. Bambusove stapke su promjera 3 cm i dužine 46 cm. Promjer stapki bambusa za ispitivanja odgovara prosječnom promjeru cijevi sjedala okvira bicikla koji je opterećen na izvijanje. Odabrana dužina (46 cm) odgovara dužini cijevi sjedala okvira bicikla za bicikl veličine M [75] i ujedno je gornja granica duljine koja se može smjestiti u vlažnu komoru. Uzorci bambusa prikazani su na slici 28.



Slika 28. Uzorci bambusa za ispitivanje

Bambus za ispitivanja je dostavljen od Import Europe B.V. (Nizozemska). Prema dostavljenim podacima, bambus je ubran u Kini 2017. godine. U trenutku rezidbe, stabljike su bile stare oko 5 godina i potom su skladištene bez dodatne obrade površine u razdoblju od 2 do 6 mjeseci pri temperaturi 12 °C do 18 °C uz relativnu vlažnost zraka 60 %.

Nakon detaljnog pregleda svakog uzorka ustanovljena su uzdužna puknuća na 20 od 80 uzoraka. Dvadeset nekvalitetnih uzoraka nisu korištena u radu zbog toga što je puknućima narušena homogenost materijala kao i mehanička svojstva. Puknuća nisu površinska, nego

kroz cijeli poprečni presjek, od ruba uzorka do čvora ili između 2 čvora (a ne duž cijele dužine uzorka). Pretpostavka je da je do puknuća došlo prilikom transporta zbog okolišnih utjecaja, promjene temperature i vlage što je izazvalo naglo sušenje uzoraka.

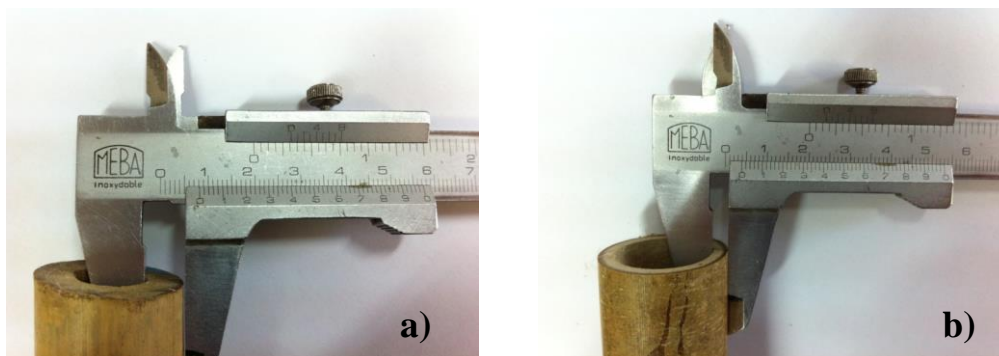


Slika 29. Prikaz uzdužnih puknuća uzoraka na poprečnom presjeku



Slika 30. Prikaz uzdužnih puknuća na vanjskoj stijenci

Osim uzdužnih puknuća, na nekim uzorcima uočena je iznimno velika razlika vanjskog i unutarnjeg promjera stijenke bambusa. Promjer svakog bambusa je različit. Bambusove stabljike su, kao i ostale biljke, deblje u bazi nego na vrhu. Kako su naručeni uzorci bambusa izrezani iz cijelog stupa bambusa dužine 3 metra, tako su neki uzorci bili dio baze stupa, a neki vrh stupa. Kako ne bi došlo do velikih odstupanja u rezultatima ispitivanja, uzorci veće debljine stijenke od ostalih (9kom) nisu korišteni u radu.



Slika 31. Prikaz razlike debljine stijenke dvaju uzoraka sa slike a) i b)



Slika 32. Uzorci koji uvelike odstupaju od ostalih uzoraka u pogledu debljine stijenke

Uzorci koji su odabrani za diplomski rad podijeljeni su u 4 skupine po 10 uzoraka u svakoj. Svaka skupina je višestruko zamotana u folije, spremljena na suho i tamno mjesto kako bi se minimizirao utjecaj temperature i vlage na uzorke i spriječilo njihovo daljnje pucanje ili slične promjene. Ovako skladišteni uzorci pri sobnoj temperaturi, izvađeni su iz zaštitne folije prije nastavka ispitivanja, tj. prije vaganja i stavljanja u vlažnu komoru. Sva ispitivanja provedena su u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 33. Sortirani uzorci po skupinama i skladišteni u foliji

5. ISPITIVANJE U VLAŽNOJ KOMORI – utjecaj vlage

Ispitivanjem u vlažnoj komori simulira se ponašanje materijala u vlažnoj i toploj atmosferi uz kondenziranje vode. Uzorci su bili izloženi vlazi kako bi se ispitala promjena mehaničkih svojstava nakon izloženosti od 1 dan, 5 dana i 10 dana i usporedila sa suhim uzorcima koji nisu bili pod utjecajem dodatne vlažnosti. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala na uređaju proizvođača C&W, Humidity Cabinet Model AB6. Temperatura ispitivanja bila je 40 ± 3 °C, a relativna vlažnost zraka je oko 100 % s orošavanjem uzoraka.

Prije stavljanja uzoraka u vlažnu komoru, izmjerena im je masa u Laboratoriju za tribologiju na uređaju za mjerenje mase RADWAG WLC 1/A2/C/2, kapaciteta 1000 g i čitljivosti 0,01 g.



Slika 34. Mjerenje mase uzoraka

Uzorci bambusa su šuplje stapke koje je bilo potrebno na krajevima zatvoriti polimernom prijanjajućom folijom kako bi vlaga prodirala samo kroz vanjsku stijenku, a ne ulazila u šupljinu bambusa i stvarala neželjene učinke. Prijanjajuća folija na krajevima bambusa dodatno osigurana stezljivim gubicama.



Slika 35. Uzorci bambusa pripremljeni za ispitivanje u vlažnoj komori



Slika 36. Uzorci postavljeni u vlažnu komoru

Uzorci su smješteni u vlažnoj komori u skupinama po 10 uzoraka zbog ograničenih dimenzija vlažne komore i podijeljeni su u skupine prema sljedećoj tablici.

Tablica 2. Podijela uzoraka na skupine

UZORCI	VLAŽNA KOMORA [broj dana]	SKUPINA
od S-1 do S-10	0	SUHO
od V-20 do V-30	1	VLAŽNO 1
od V-10 do V-20	5	VLAŽNO 5
od V-1 do V-10	10	VLAŽNO 10

Na slici 37 su prikazani uzorci koji su izloženi vlažnoj komori 10 dana. Na njima se primjećuju promjene na vanjskoj površini stapki nakon djelovanja vlage. Uzorci na opip djeluju jako vlažni, topli i znatno teži, nego prije komore. Zbog kondenzacije vode, na površini se pojavila plijesan koja je obrisana s uzoraka nakon vađenja iz komore. Uzorci su na pojedinim dijelovima promijenili boju iz svjetlije u tamniju što upućuje da su zbog svoje nehomogenosti, neki dijelovi vanjske stijenke upili više vlage, a neki manje. Uzorci koji su bili u vlažnoj komori 1 i 5 dana su također imali promjene na vanjskoj stijenci ali se na njima nije počela javljati plijesan.



Slika 37. Uzorci VLAŽNO 10 izvađeni iz vlažne komore nakon 10 dana

Skupine uzoraka su nakon zadanog vremena izvađene iz vlažne komore i pritom im je ponovno izmjerena masa kako bi se ustanovile promjene u masi uzoraka.

U tablicama 3, 4 i 5 su prikazane:

POČETNA MASA (masa uzoraka prije stavljanja u vlažnu komoru),

MASA NAKON VLAŽNE KOMORE (masa uzoraka nakon izlaganja u vlažnoj komori),

Δm – masa vlage koja se akumulirala tijekom izlaganja uzoraka u vlažnoj komori i
 PROMJENA VLAGE koja predstavlja postotak promjene vlage u uzorku, a ne predstavlja
 ukupni postotak vlage u bambusu jer je uzorak prije stavljanja u vlažnu komoru tj. suhi
 uzorak također sadržavao određeni postotak vlage.

Tablica 3. Promjena mase uzoraka VLAŽNO 1

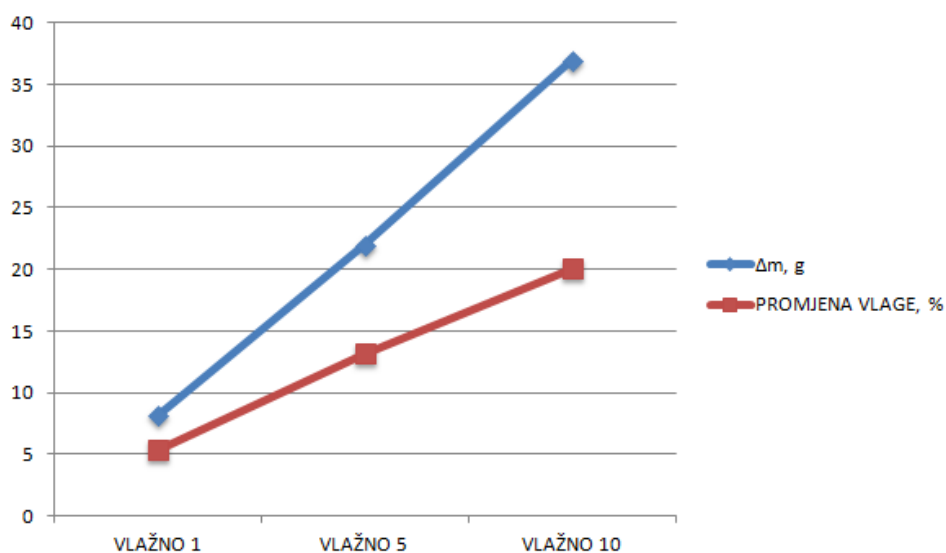
UZORAK	POČETNA MASA, g	MASA NAKON VLAŽNE KOMORE, g	Δm , g	PROMJENA VLAGE, %
V-21	174,03	182,19	8,16	4,48
V-22	164,64	175,91	11,27	6,41
V-23	125,34	132,13	6,79	5,13
V-24	124,41	132,53	8,12	6,12
V-25	126,01	134,09	8,08	6,03
V-26	108,88	116,94	8,06	6,89
V-27	185,04	192,29	7,25	3,77
V-28	173,40	181,06	7,66	4,23
V-29	155,35	163,38	8,03	4,91
V-30	139,88	148,14	8,26	5,60
\bar{X}			8,16	5,35

Tablica 4. Promjena mase uzoraka VLAŽNO 5

UZORAK	POČETNA MASA, g	MASA NAKON VLAŽNE KOMORE, g	Δm , g	PROMJENA VLAGE, %
V-11	116,60	136,48	19,88	14,57
V-12	137,28	159,96	22,68	14,18
V-13	140,98	160,39	19,41	12,10
V-14	164,65	185,35	20,7	11,16
V-15	140,01	156,97	16,96	10,80
V-16	146,90	171,77	24,87	14,48
V-17	159,35	184,28	24,93	13,53
V-18	155,64	175,77	20,13	11,45
V-19	137,99	157,74	19,75	12,52
V-20	149,60	180,07	30,47	16,92
\bar{X}			21,98	13,17

Tablica 5. Promjena mase uzoraka VLAŽNO 10

UZORAK	POČETNA MASA, g	MASA NAKON VLAŽNE KOMORE, g	Δm , g	PROMJENA VLAGE, %
V-1	116,33	157,13	40,8	25,96
V-2	164,36	201,56	37,2	18,45
V-3	150,56	185,19	34,63	18,69
V-4	127,73	165,95	38,22	23,03
V-5	151,21	186,29	35,08	18,83
V-6	157,25	192,74	35,49	18,41
V-7	154,80	186,10	31,3	16,81
V-8	148,82	190,46	41,64	21,86
V-9	152,15	186,96	34,81	18,61
V-10	168,38	208,94	40,56	19,41
\bar{X}			36,97	20,06

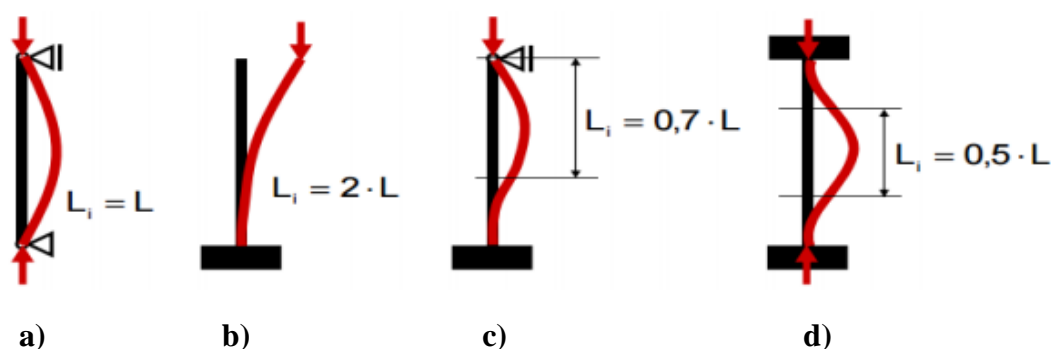


Slika 38. Grafički prikaz prosječnih iznosa promijene mase i vlage po skupinama

Iz tablica 3, 4 i 5 i slike 38 se može zaključiti da je nakon izlaganja u vlažnoj komori došlo do značajnih promjena u masi svih uzoraka. Kod skupine VLAŽNO 10 zabilježen je najveći porast mase, u prosjeku 20%, kod skupine VLAŽNO 5 - 13% dok je kod skupine VLAŽNO 1 porast mase iznosio prosječno 5%, što uvelike utječe na ukupnu promjenu mase bicikla proizvedenog od bambusa. Slika 38 grafički prikazuje linearan prirast prosječnih iznosa promijene mase i vlage po skupinama iz čega bi se mogli predvidjeti utjecaji vlage na bambus nakon 15, 20 ili više dana.

6. ISPITIVANJE UZORAKA BAMBUSA NA IZVIJANJE

Izvijanje je gubitak stabilnosti ravnog štapa ili nekog drugog vitkog elementa konstrukcije, osno opterećenoga prekomjerno velikom tlačnom silom. Granična vrijednost tlačne sile, do koje štap još zadržava svoj prvobitni oblik, naziva se kritičnom silom. Intenzitet kritične sile pri kojem nastaje izvijanje ovisi o vitkosti štapa, to jest načinu učvršćenja njegovih krajeva i njegovim geometrijskim svojstvima, te o mehaničkim svojstvima materijala od kojega je štap načinjen.



Slika 39. Načini učvršćivanja krajeva štapa [76]

Prema načinu učvršćivanja krajeva štapa razlikujemo četiri slučaja izvijanja štapa:

- a) štap zgloбно učvršćen na oba kraja,
- b) štap na jednom kraju uprt, a na drugom slobodan (konzola),
- c) štap s jednim uprtim, a drugim pomičnim ležajem,
- d) štap uprt na oba kraja. [76]

Ispitivanje uzoraka bambusa na izvijanje provedeno je na uređaju proizvođača: Heckert, tip: WPM, EU 40 MOD, klasa točnosti: 0,5, pri sobnoj temperaturi uz brzinu 10 mm/min. Ispitivanja su provedena na svim uzorcima odmah nakon vlažne komore kako bi bio što manji utjecaj okoline na uzorke. Na uzorcima je izmjerena masa, te vanjski i unutarnji promjer.

Bambusove stapke su cilindričnog oblika pa je uzeta srednja vrijednost promjera koji je mjeran na svakom kraju cijevi i na sredini. Uzorcima je na krajevima postavljena spužva kako ne bi kliznuli s ravne površine dijela uređaja koji ih pritišće. Uređaj za ispitivanje je prikazan na slici 40, a uzorak postavljen za ispitivanje je prikazan na slici 41.



Slika 40. Uređaj na kojem su uzorci ispitivani na izvijanje



Slika 41. Prikaz postavljanja uzoraka za ispitivanje

U daljnjem dijelu rada bit će prikazani rezultati ispitivanja bambusa na izvijanje po skupinama SUHO, VLAŽNO 1, VLAŽNO 5 i VLAŽNO 10. Sila pri kojoj se pojavljuje izvijanje je kritična sila, tj. sila izvijanja F_k . Djelovanje te sile na bambus presjeka A uzrokuje u njemu naprezanje izvijanja σ_k .

Izraz za naprezanje izvijanja glasi: [77]

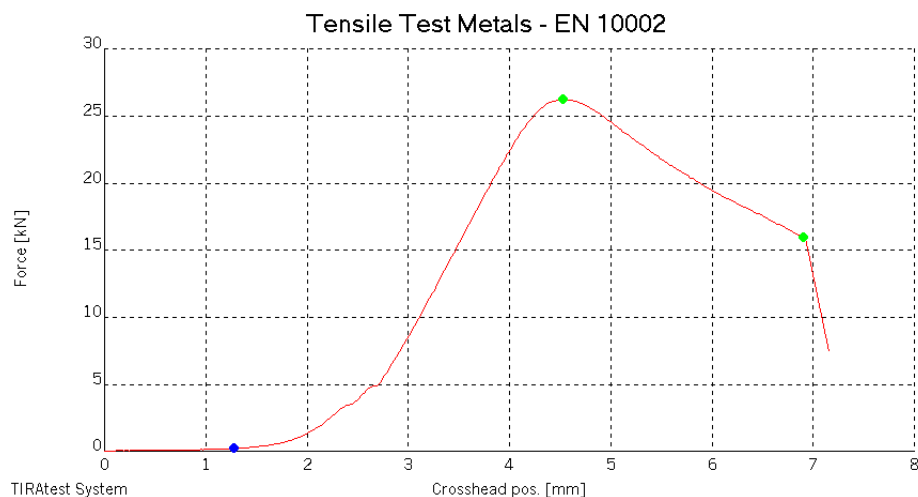
$$\sigma_k = \frac{F_k}{A}$$

Rezultati provedenih ispitivanja nalaze u tablicama gdje je: d_1 – vanjski promjer [mm], d_2 – unutarnji promjer [mm], F_k – sila izvijanja [N], F_b – sila kidanja [N], A – površina presjeka [mm²], σ_k – naprezanje izvijanja [N/mm²].

SUHO

Tablica 6. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka SUHO

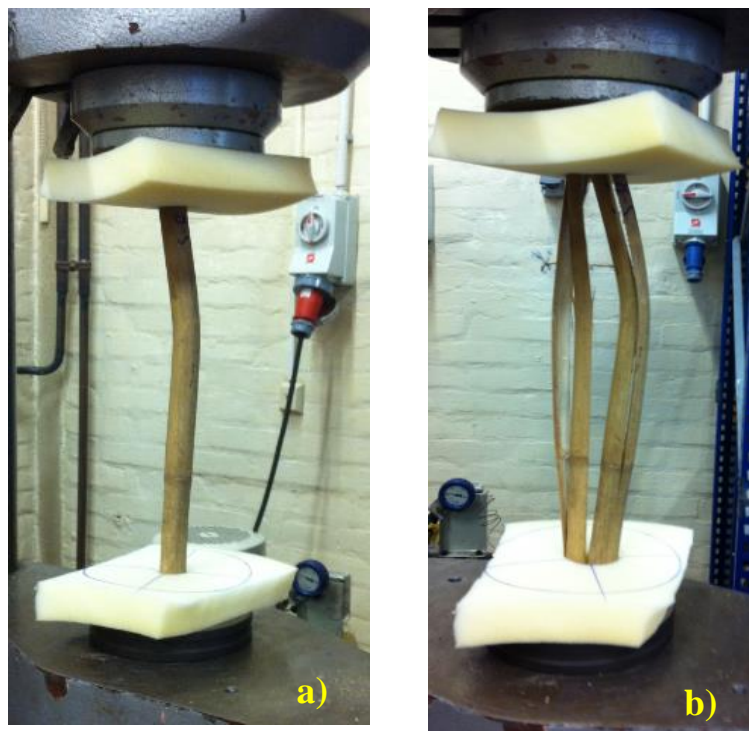
UZORAK	d_1 [mm]	d_2 [mm]	F_k [N]	F_b [N]	A [mm ²]	σ_k [N/mm ²]
S-1	28,81	21,19	24963	13815	299,24	82,52
S-2	29,73	21,67	20871	20871	325,38	64,14
S-3	28,65	20,19	26236	15946	324,52	80,84
S-4	31,68	22,82	28800	16248	379,25	75,94
S-5	28,85	19,28	22151	11377	361,76	61,23
S-6	30,11	21,01	26323	17192	365,36	72,05
S-7	29,30	19,16	27131	18641	358,93	75,59
S-8	27,85	16,55	30292	19793	394,05	76,87
S-9	30,85	21,31	30222	22317	390,82	77,33
S-10	28,12	19,72	24195	15726	315,62	76,66
\bar{X}	29,39	20,29	26118	17192	351,49	74,32



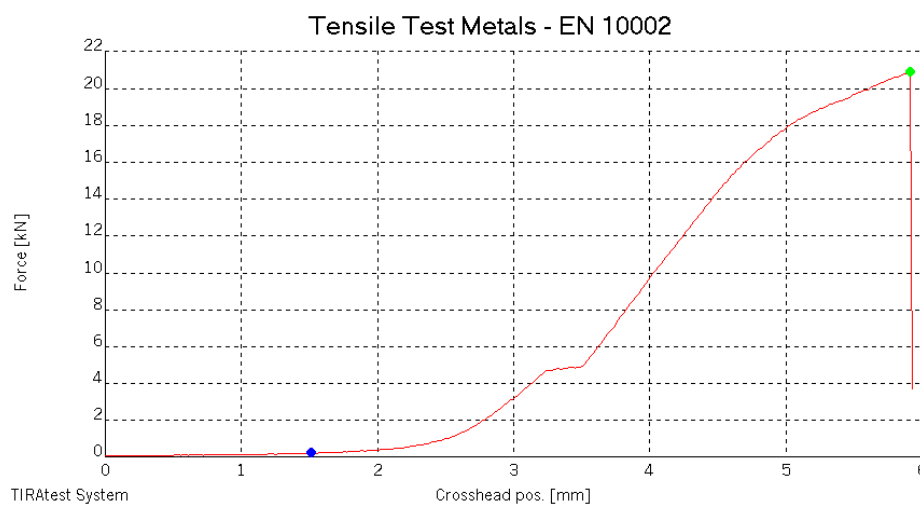
Slika 42. Dijagram izvijanja uzorka S-3

Vrijednosti u tablici 6, pokazuju kako je prosječna kritična sila suhih uzoraka 26118 N, dok je sila kidanja uzoraka, tj. sila pri kojoj je došlo do loma uzoraka 17192 N. Uzorci S-7, S-8, S-9 i S-10, koji su imali 2 čvora, pokazuju prosječno 23% veći iznos kritične sile, a 5 % veće naprezanje izvijanja od uzoraka koji su imali samo jedan čvor. Navedeno upućuje da broj čvorova utječe na rezultat u vidu povećanja otpornosti na opterećenje izvijanja.

Iz slike 42, vidljivo je da nakon 2 mm kontrakcije uzorka po uzdužnoj osi, sila opterećenja uzorka naglo raste do maksimalnog iznosa $F=26$ kN što predstavlja kritičnu silu izvijanja. Nakon postizanja F_k slijedi blaži pad sile opterećivanja prema sili kidanja (F_b) uzorka u iznosu od 16 kN. Na slici 43 a) prikazano je izvijanje bambusove stapke neposredno prije loma uzorka S-8, slika 43 b).



Slika 43. Izvijanje a) i lom b) uzorka S-8



Slika 44. Dijagram izvijanja uzorka S-2

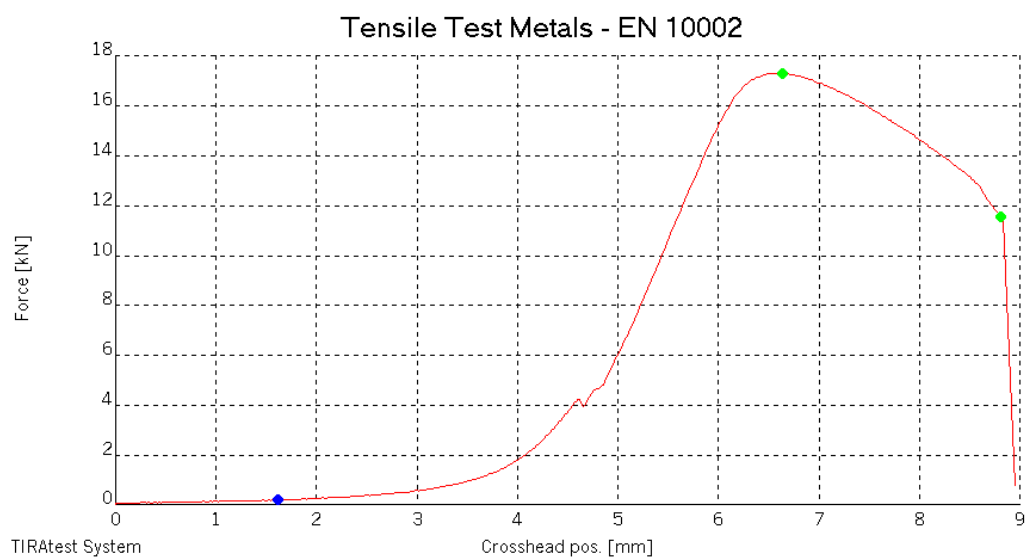
Na slici 44 je prikazan dijagram ispitivanja na izvijanje uzorka S-2 iz kojeg je vidljivo da u trenutku dostizanja kritične sile, tj. sile izvijanja dolazi do loma uzorka, iz čega se zaključuje da su maksimalna i kritična sila jednakih iznosa 20871 N. Uzorak S-2 je jedini uzorak od svih skupina kod kojeg je došlo do loma uslijed dostizanja maksimalne sile dok je kod ostalih uzoraka izražena maksimalna i konačna sila. S-2 dimenzijama ne odstupa od ostalih, ima 1 čvor na sredini i nema vidljivih površinskih oštećenja.

VLAŽNO 1

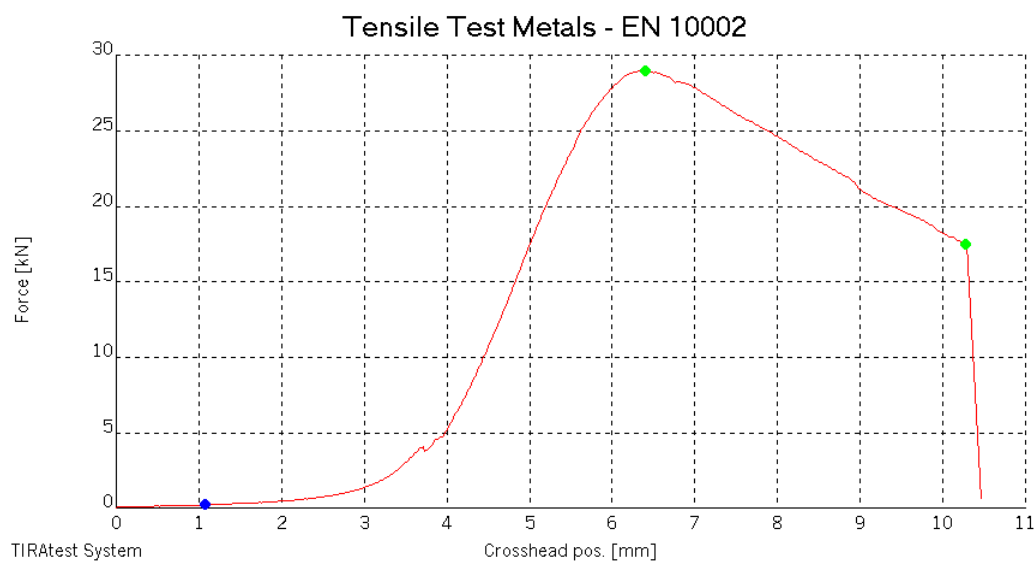
Tablica 7. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka VLAŽNO 1

UZORAK	d_1 [mm]	d_2 [mm]	F_k [N]	F_b [N]	A [mm ²]	σ_k [N/mm ²]
V-21	31,90	23,24	21964	14005	375,04	58,56
V-22	30,11	19,31	24129	13283	419,20	57,56
V-23	28,41	20,41	18149	10314	306,75	59,17
V-24	27,85	18,71	17917	9007	324,23	55,26
V-25	31,35	22,75	17292	11532	365,41	47,32
V-26	27,58	20,12	16756	9259	279,48	59,95
V-27	31,05	20,85	23650	18165	415,77	56,88
V-28	31,87	21,73	28962	17504	426,87	67,84
V-29	29,85	19,25	26333	14628	408,77	64,42
V-30	30,88	22,64	19412	15385	346,36	56,05
\bar{X}	30,08	20,90	21456	13308	366,79	58,30

U tablici 7 se nalaze rezultati ispitivanja na izvijanje, skupine VLAŽNO 1. Uzorci V-27, V-28, V-29 i V-30 imali su 2 čvora i pokazuju 21% veći iznos kritične sile i 10% veći iznos naprezanja izvijanja, nego uzorci koji su imali samo jedan čvor.



Slika 45. Dijagram izvijanja uzorka V-25



Slika 46. Dijagram izvijanja uzorka V-28

Kod sve 4 skupine dijagrama izvijanja primjećuje se mirovanje ili minimalni pad sile opterećenja u intervalu od 4 kN do 6 kN. Za pretpostaviti je da pri tim opterećenjima dolazi do promjene u mikrostrukturi uzoraka. Slike 45 i 46 s dijagramima izvijanja uzoraka V-25 i V-28 prikazane su kao primjer da kod različitog iznosa maksimalne sile i sile kidanja, dolazi do pada ili mirovanja sile uvijek u istom intervalu.

VLAŽNO 5

Tablica 8. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka VLAŽNO 5

UZORAK	d_1 [mm]	d_2 [mm]	F_k [N]	F_b [N]	A [mm ²]	σ_k [N/mm ²]
V-11	29,27	20,87	17500	9045	330,79	52,91
V-12	30,15	22,77	19357	12902	306,74	63,11
V-13	29,19	19,26	21181	10678	377,86	56,05
V-14	30,92	22,6	22895	14591	349,73	64,46
V-15	29,98	19,05	18357	12227	420,89	43,62
V-16	30,87	22,79	21055	13146	340,53	61,83
V-17	29,48	20,06	18220	10969	366,51	49,68
V-18	29,82	20,38	23946	13753	372,19	64,34
V-19	30,14	20,49	19598	11795	383,72	51,22
V-20	28,87	18,97	19625	9995	371,98	52,75
\bar{X}	29,87	20,72	20173	11910	362,09	55,99

Rezultati ispitivanja na izvijanje skupine VLAŽNO 5 pokazuju iznose maksimalnih sila i naprezanja izvijanja koji su niži i od skupine SUHO i VLAŽNO 1. Prosječna maksimalna sila iznosi 20173 N, a naprezanje izvijanja 55,99 N/mm². Zadnja četiri uzorka su imali 2 čvora dok ostali 1 čvor i nema značajnih razlika u prosječnim iznosima maksimalnih sila i naprezanja izvijanja između tih uzoraka.

VLAŽNO 10

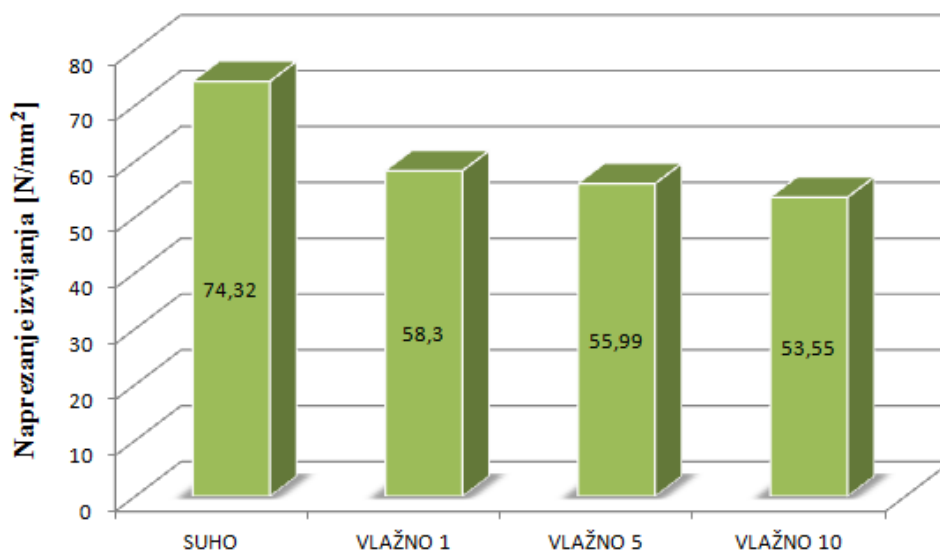
Tablica 9. Rezultati ispitivanja na izvijanje uzoraka VLAŽNO 10

UZORAK	d_1 [mm]	d_2 [mm]	F_k [N]	F_b [N]	A [mm ²]	σ_k [N/mm ²]
V-1	30,55	22,95	17330	9377	319,34	54,27
V-2	29,95	19,55	20272	10805	404,32	50,14
V-3	28,05	18,85	22289	11916	338,88	65,77
V-4	30,33	22,66	16336	8812	319,21	51,18
V-5	31,57	22,93	18087	11003	369,83	48,91
V-6	30,85	22,35	18944	13519	355,15	53,34
V-7	28,31	18,85	19205	10297	350,39	54,81
V-8	29,42	19,9	17768	9096	368,77	46,55
V-9	30,52	21,62	21252	12488	364,46	58,31
V-10	28,53	17,69	20555	10839	393,50	52,23
\bar{X}	29,81	20,74	19203	10815	358,39	53,55



Slika 47. Uzorak V-2 u trenutku loma a) i uzorci V-4 i V-7 nakon rasterećenja b)

Na slici 47 prikazan je trenutak dostizanja sile kidanja uzorka V-2, slika 47 a) i uzorci V-4 i V-7 nakon rasterećenja, slika 47 b). Na uzorcima sa slike se primjećuje poprečni lom i to na polovini duljine uzorka što može upućivati da je na tom dijelu uzorka vanjska stijenka propustila puno vlage te je došlo do slabljenja veza u mikrostrukтури materijala. Kod svih drugih uzoraka i iz svih skupina uočeno je uzdužno pucanje uzorka prilikom dostizanja sile kidanja kao što je prikazano slikom. Uzdužna pucanja bila su kod skupine SUHO najčešće po cijeloj dužini uzorka, neovisno o čvoru, dok se kod skupine VLAŽNO 1 i VLAŽNO 5 uzdužna pukotina kod uzorka zaustavila prije čvora.



Slika 48. Grafički prikaz naprezanja izvijanja po skupinama

Prosječni rezultati naprezanja izvijanja po skupinama, prikazanih na slici 48, pokazuju značajno sniženje iznosa naprezanja izvijanja između uzoraka SUHO i uzoraka koji su bili izloženi u vlažnoj komori. Uzorci s 2 čvora su u podnijeli višu maksimalnu silu opterećenja, za 23% i 21 % kod skupina SUHO i VLAŽNO 1, dok kod ostalih skupina nema znatnijih razlika. Može se zaključiti da oslabe strukturne veze u mikrostrukturi uzorka uslijed većih udjela vlage u uzorku. Nakon što se u uzorku udio vlage poveća za 5%, 13% odnosno 20%, iznos naprezanja izvijanja se smanji za 22%, 25% odnosno 28%. Zaključak je da treba djelovati na spriječavanje povećanja udjela vlage u bambusima bilo premazima ili nekim termičkim obradama površine kako ne bi došlo do narušavanja mehaničkih svojstava materijala bambusa.

7. MODUL ELASTIČNOSTI

Modul elastičnosti je fizikalna veličina koja opisuje koliko se elastična tijela skraćuju ili produljuju pod djelovanjem sile ovisno o materijalu od kojega su načinjena. [78] To je vrlo važno mehaničko svojstvo materijala koje predstavlja krutost materijala. Modul elastičnosti bit će izračunat preko dobivenih rezultata ispitivanja na izvijanje bambusovih štapova.

Sila pri kojoj se pojavljuje izvijanje je sila izvijanja F_k . Djelovanje te sile na bambus presjeka A uzrokuje u njemu naprezanje izvijanja σ_k . [77]

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A}$$

Sila izvijanja i naprezanje izvijanja ovise o vitkosti štapa λ , gdje su l_0 slobodna duljina izvijanja, a i polumjer tromosti.

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

Slobodna duljina izvijanja l_0 za ovu vrstu opterećenja iznosi $l_0 = l$.

Polumjer tromosti i se računa prema izrazu, gdje je A površina poprečnog presjeka štapa, a I_{min} najmanji aksijalni moment presjeka štapa. Gdje je $D = d_1$, a $d = d_2$.

$$i = \sqrt{I_{min}/A}$$

$$I_{min} = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

Jednadžba za elastično izvijanje glasi:

$$F_k = \pi^2 \frac{EI_{min}}{l_0^2}$$

Iz koje slijedi jednadžba za elastično naprezanje izvijanja:

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A} = \pi^2 \frac{EI_{min}}{l_0^2 A} = \pi^2 \frac{E}{\lambda}$$

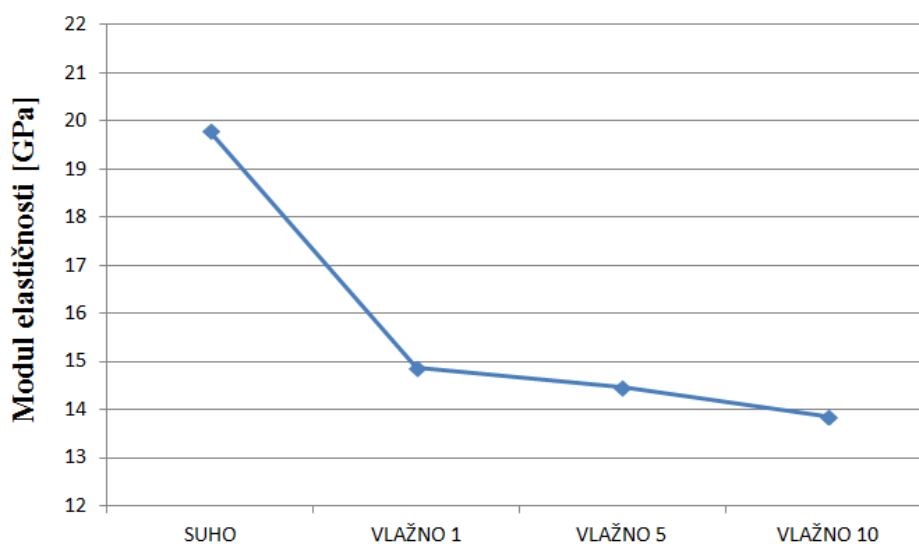
Izraz za izračun modula elastičnosti preko izračunate vrijednosti naprezanja izvijanja i dimenzija poprečnog presjeka iz jednadžbe za elastično naprezanje izvijanja glasi:

$$E = \frac{\sigma_k l_0^2 A}{\pi^2 I_{min}}$$

Modul elastičnosti izračunat je za svaku skupinu iz prosječnih vrijednosti mjerenih i izračunatih rezultata iz tablica 6, 7, 8 i 9. Vrijednosti modula elastičnosti za pojedinu skupinu prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati modula elastičnosti za pojedinu skupinu

SKUPINA	σ_k [N/mm ²]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	I_{min} [mm ⁴]	A [mm ²]	E [GPa]
SUHO	74,32	29,39	20,29	28304,69	351,49	19,78
VLAŽNO 1	58,30	30,08	20,90	30820,57	366,79	14,87
VLAŽNO 5	55,99	29,87	20,72	30028,55	362,09	14,47
VLAŽNO 10	53,55	29,81	20,74	29680,54	358,39	13,86



Slika 49. Grafički prikaz modula elastičnosti po skupinama

Iz tablice 10 i grafičkog prikaza [Slika 49], vidljivo je sniženje modula elastičnosti pri različitoj vlažnosti bambusovih stapki. Skupina SUHO ima najveći modul elastičnosti - 19,78 GPa dok skupina VLAŽNO 10 ima najmanji od 13,86 GPa što je i očekivano pošto je kod ispitivanja izvijanjem pokazivala najmanje iznose kritičnih sila. Zaključak je da se porastom udjela vlage u bambusu za 5%, 13% i 20% modul elastičnosti smanjuje za 25%, 27% i 30%. Najveća razlika je između skupine SUHO i VLAŽNO 1 iz čega proizlazi da se malim povećanjem udjela vlage u bambusu znatno narušava vrijednost modula elastičnosti bambusa.

8. ODREĐIVANJE ŽILAVOST BAMBUSA

Žilavost je sposobnost materijala da se odupire promjeni oblika u uvjetima udarnog opterećenja, savijanja i torzije. Najčešće je povezana s otpornošću materijala na udarce (udarna žilavost) ili s otpornošću materijala na širenje pukotine (lomna žilavost), a u sklopu ovog rada određuje se udarna žilavost. Prema normi EN ISO 179 koriste se epruvete dimenzija 80x10x4, gdje se još posljednje dvije dimenzije b i h dodatno mjere pri izračunu udarne radnje loma. Ispitivanje žilavosti materijala po Charpyju je jedno od najstarijih mehaničkih ispitivanja materijala u eksploatacijskim uvjetima, a služi za utvrđivanje njegove otpornosti prema krhkom lomu. Na Charpyjevu batu [Slika 50], uzorak se ispituje jednim udarcem bata s brzinom obično 5 do 5,5 m/s. Ispitivanje se izvodi tako da se epruveta stavi u oslonac, te se s određene visine spušta bat da slobodnim padom lomi epruvetu. Količina kinetičke energije koja se utroši za lom ispitnog uzorka je mjera žilavosti materijala. Ispitivanje udarne žilavosti provedeno je u Laboratoriju za polimere i kompozite.



Slika 50. Uredaj za ispitivanje udarne radnje loma

Ispitivanje se provodilo na 10 epruveta zadanih dimenzija za svaku od pojedine 4 skupine različite vlažnosti bambusa pri sobnoj temperaturi i vlažnosti zraka 40-50%.

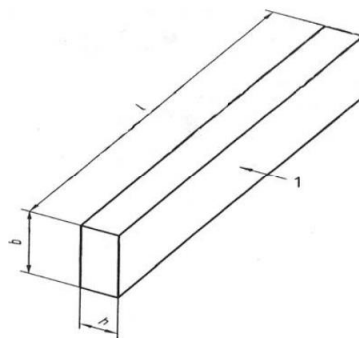
Mjera za žilavost je količina energije, izražena u Jouleima (J), koja je potrebna da se epruveta prelomi uslijed udarca, a udarna radnja loma računa se prema izrazu: [80]

$$a_{kN} = \frac{E_c}{h * b} * 10^3$$

gdje je:

a_{kN} – udarna radnja loma, kJ/m^2 , E_c – energija loma, J, h – debljina epruvete, mm, b – širina epruvete, mm.

Na slici 51 prikazan je oblik i dimenzije epruvete: l – dužina epruvete, b – širina epruvete, h – debljina epruvete i 1 – smjer udara.



Slika 51. Dimenzije ispitnog uzorka [79]

Epruvete prema normi EN ISO 179 su epruvete bez zareza i ispituje se minimalno 10 uzoraka. [80] Na slici 52 prikazano je 10 ispitnih uzoraka skupine VLAŽNO 10, a svi uzorci su izrezani iz dijela bambusa koji nije sadržavao čvor.



Slika 52. Epruvete od V-1 do V-10 pripremljene za ispitivanje udarne radnje loma



Slika 53. Epruvete uzorka VLAŽNO 10 nakon ispitivanja udarne radnje loma

Slika 53 prikazuje izgled epruveta VLAŽNO 10 nakon ispitivanja žilavosti na Charpyevom batu. Kako je prema [81] prilikom iskazivanja rezultata, potrebno navesti uvjete ispitivanja i oblik loma (C, H, P ili N), gdje je C = potpuni lom, H = zglobni prijelom (samo savinuto kao zglob, ali nema odvajanja), P = djelomični lom (ali bez zgloba), N = nema loma, prilikom ispitivanja udarne radnje loma bambusa, svih 10 ispitnih uzoraka iz svake skupine imali su oblik loma H. [81]

Tijekom ispitivanja žilavosti mjereni su iznosi dimenzija pojedine epruvete i na mjernom satu Charpyevog bata očitani iznosi energije koja je utrošena za lom ispitnog uzorka. Na temelju tih podataka izračunata je udarna radnja loma materijala i rezultati su prikazani u tablicama 11, 12, 13 i 14.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: SUHO

UZORAK	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	a_{kN} [kJ/m ²]
S-1	10,68	4,76	2,65	52,12
S-2	10,42	4,20	1,95	44,56
S-3	10,46	4,18	2,45	56,03
S-4	10,6	4,3	3,35	73,49
S-5	10,58	4,62	2,95	60,35
S-6	10,54	4,50	2,15	45,32
S-7	10,48	4,34	3,5	77,31
S-8	10,74	5,32	3,4	59,50
S-9	10,6	4,62	2,75	56,15
S-10	10,82	4,1	3,1	69,87
\bar{X}			2,83	59,47

Tablica 12. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: VLAŽNO 1

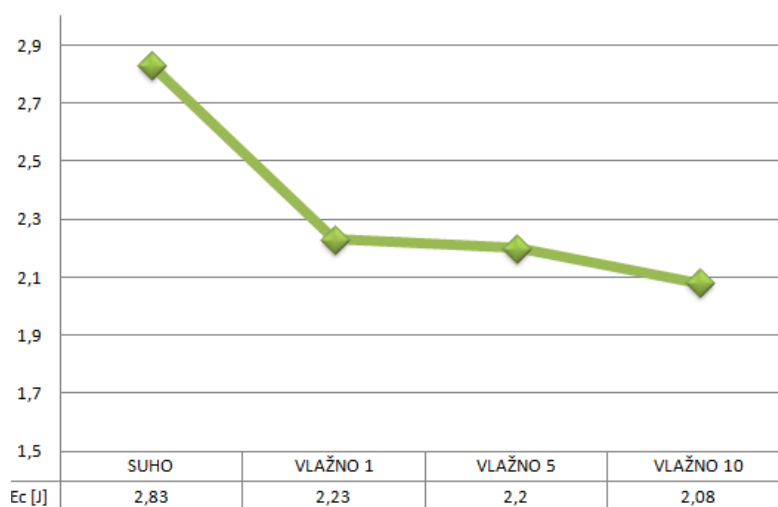
UZORAK	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	a_{kN} [kJ/m ²]
V-21	10,44	5,14	2,45	45,65
V-22	10,89	5,18	2,55	45,25
V-23	11,60	3,50	2,6	64,04
V-24	11,16	4,72	2,62	49,36
V-25	10,82	3,84	2,0	48,14
V-26	11,16	3,98	1,82	40,98
V-27	10,68	3,48	1,5	40,35
V-28	10,52	4,70	2,35	47,53
V-29	10,50	5,20	2,6	47,62
V-30	10,24	3,88	1,88	47,32
\bar{X}			2,23	47,62

Tablica 13. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: VLAŽNO 5

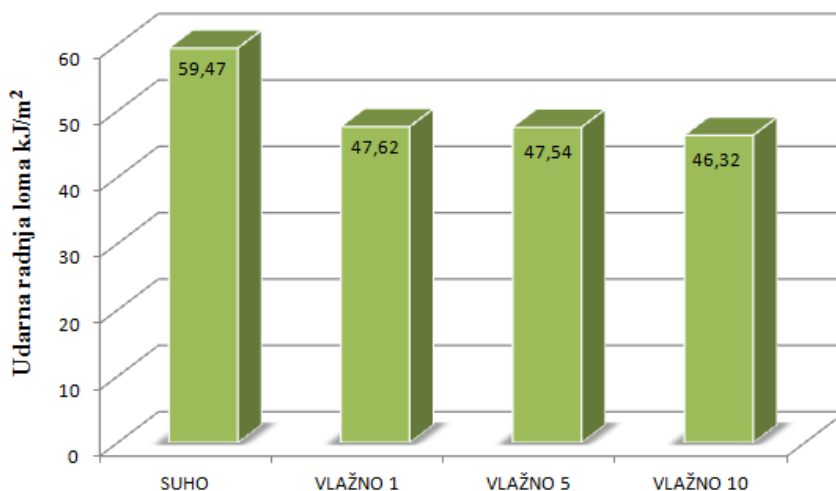
UZORAK	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	a_{kN} [kJ/m ²]
V-11	10,22	4,92	1,15	22,87
V-12	10,32	3,52	1,5	41,29
V-13	10,22	4,10	1,7	40,57
V-14	11,14	4,12	2,2	48,16
V-15	10,62	5,0	2,55	48,02
V-16	10,40	3,82	1,25	31,46
V-17	10,02	5,14	2,5	48,63
V-18	10,32	4,32	3,1	69,53
V-19	10,74	4,12	3,15	71,18
V-20	10,80	5,0	2,9	53,70
\bar{X}			2,20	47,54

Tablica 14. Rezultati ispitivanja žilavosti za uzorke: VLAŽNO 10

UZORAK	b [mm]	h [mm]	E_c [J]	a_{kN} [kJ/m ²]
V-1	10,78	4,86	1,6	30,54
V-2	10,12	4,26	2,45	56,82
V-3	10,26	4,42	2,4	52,92
V-4	10,26	3,98	1,5	36,73
V-5	9,98	4,18	1,9	45,54
V-6	10,0	4,22	1,75	41,46
V-7	10,36	4,46	2,1	45,44
V-8	9,62	4,50	2,1	48,51
V-9	9,56	4,48	2,0	46,69
V-10	9,96	5,06	2,95	58,53
\bar{X}			2,08	46,32



Slika 54. Srednje vrijednosti utrošene energije na Charpyevom batu

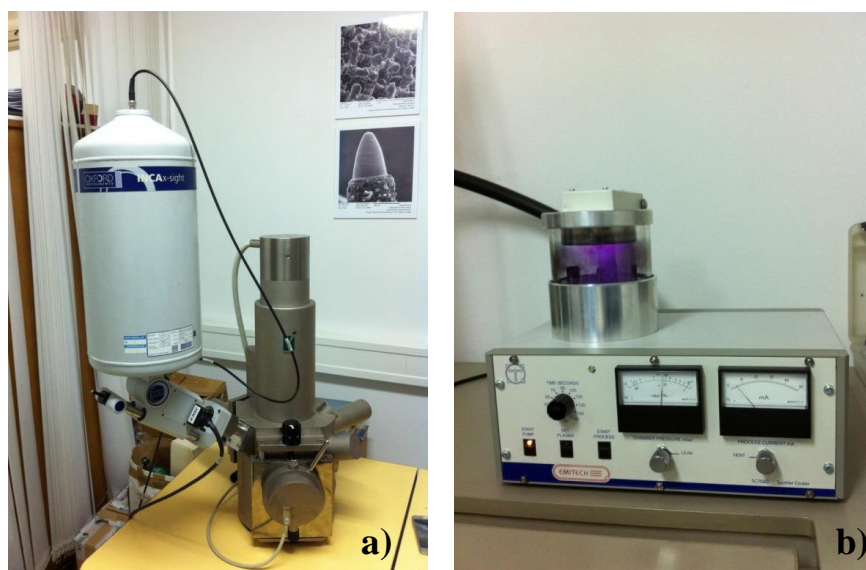


Slika 55. Srednje vrijednosti udarne radnje loma epruveta u suhom i vlažnom stanju

Na temelju dobivenih rezultata, iz tablica 11, 12, 13 i 14 i slika 54 i 55 može se uočiti kako je za prijelom ispitnog uzorka najviše energije utrošeno za uzorke skupine SUHO 2,83 J, a najmanje za skupinu VLAŽNO 10 2,08 J. Vlažni uzorci pokazuju u prosjeku 23% manju potrebnu energiju za lom, nego što je to potrebno skupini SUHO. Udarne radnje loma u kJ/m² je također najveća kod skupine SUHO i u prosjeku 20% veća, nego kod ostalih uzoraka, što upućuje da se prilikom porasta udjela vlage u bambusu za 5%, 13% i 20%, udarna radnja loma materijala smanjuje za 21%, 22% i 26%. Općenito se može zaključiti da djelovanje vlage, tj. vode kao medija ima negativan utjecaj na svojstvo žilavosti.

9. MIKROSTRUKTURA BAMBUSA UZROKOVANA LOMOM

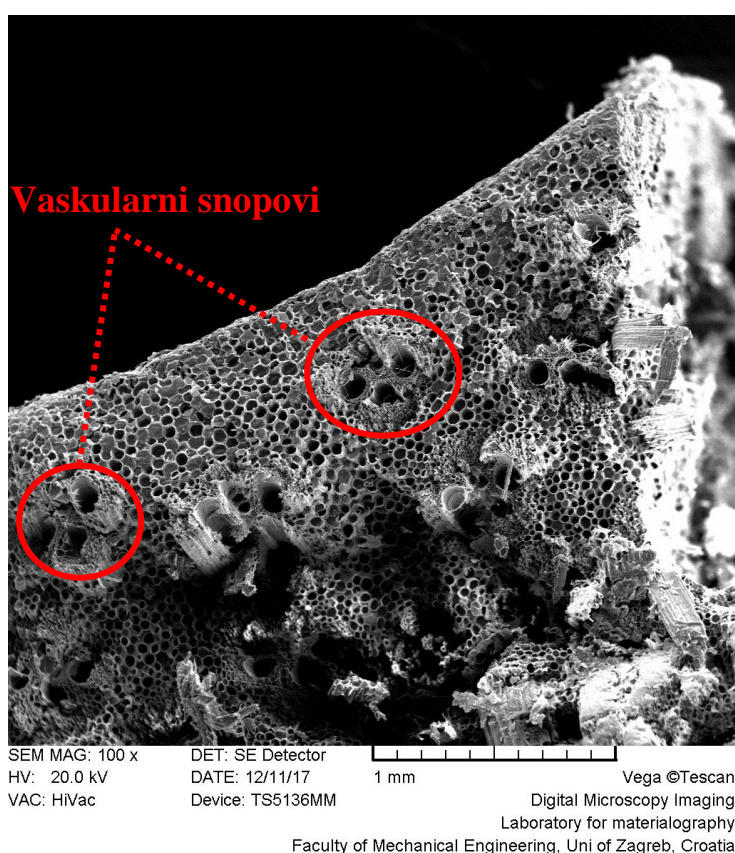
Mikrostruktura uzorka bambusa analizirala se na SEM-u, skenirajućem elektronskom mikroskopu TESCAN VEGA 5136 MM, u Laboratoriju za materijalografiju. Uzorak je izabran iz skupine SUHO zato što se na SEM-u mogu ispitivati samo suhi uzorci, a ne iz skupina VLAŽNO koje sadržavaju visoki postotak vode u strukturi. Proučavala se površina poprečnog presjeka uzorka S-8 nakon loma na Charpyevom batu. Pošto je bambus organskog porijekla i nije vodljiv materijal, zbog načina rada SEM uređaja, potrebno ga je učiniti vodljivim u procesu napanjanja vodljivim materijalom kako bi se mogao proučavati na mikroskopu. Izrezani uzorak se postavlja u uređaj EMITECH SC7620 Sputter Cooter gdje se napanje s paladijem i zlatom u trajanju od 120 sekundi. Na slici 56 b) je uređaj EMITECH prikazan u trenutku napanjanja uzorka paladijem i zlatom.



Slika 56. Uređaj a) SEM TESCAN VEGA 5136 MM i b) EMITECH SC7620

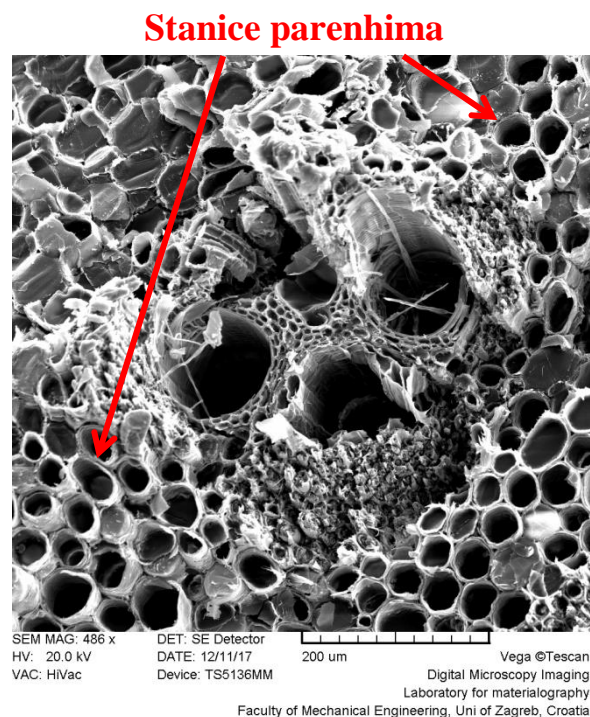
SEM mikroskopi [Slika 56 a)] rade na principu skeniranja površine preciznim snopom elektrona, a taj snop pobuđuje elektrone u sastavu atoma uzorka. Energije proizašlih elektrona iz uzorka skupljaju se, mjere specijalnim detektorima i uz pomoć mikroprocesora, stvara se trodimenzionalna slika valnih duljina elektrona jedinstven za element koji se nalazi uzorku. Kod SEM mikroskopa razlikuju se dvije vrste signala - sekundarni elektroni SE i raspršeni BSE.

Sekundarni elektroni (SE) su elektroni atoma koji su izbačeni uslijed interakcije s primarnim elektronima iz snopa. Općenito imaju vrlo malu energiju (manju od 50 eV) te mogu iskočiti samo iz vrlo plitkog dijela površine uzorka. Kao rezultat daju najbolju rezoluciju slike. Raspršeni elektroni (BSE) su primarni elektroni iz snopa koji su se odbili nazad od površine uzorka uslijed elastičnih međudjelovanja s jezgrom atoma iz uzorka. Imaju visoku energiju, koja (po definiciji) seže od 50 eV pa sve do napona koji imaju ubrzani elektroni iz snopa. [82] Na sljedećim slikama se nalazi uzorak S-8 prikazan pod SEM mikroskopom.

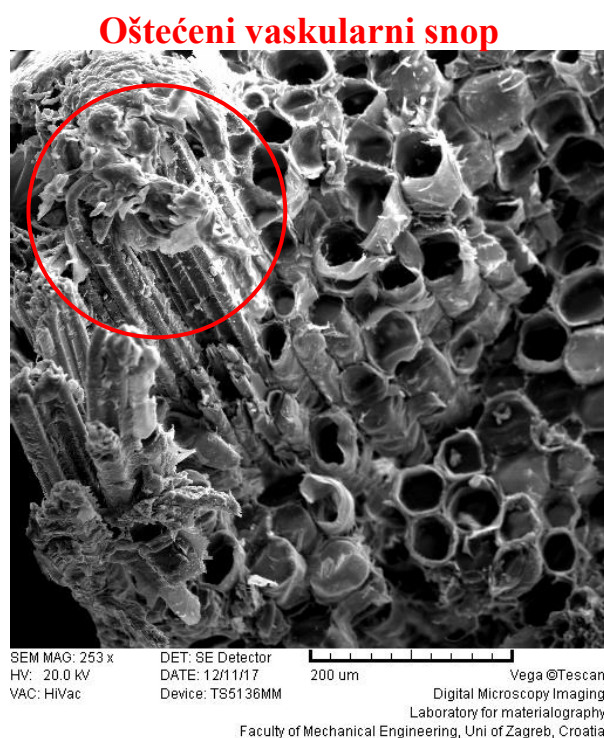


Slika 57. Prikaz prijeloma uzorka S-8

Na slici 57 je prikazan prijelom uzorka S-8. Vaskularni snopovi koji su pravilno raspoređeni po poprečnom presjeku. Lom nije površinski što može ukazivati na pojavu krhkog i žilavog loma pogotovo u području vaskularnih snopova.



Slika 58. Vaskularni snop i stanice parenhima Tonkin Cane



Slika 59. Oštećenje vaskularnog snopa i stanica parenhima Tonkin cane

Na slici 58 su vidljive stanice parenhima različitog promjera, ali dosta pravilnog, cilindričnog oblika koje okružuju vaskularni snop. Iz slike 59 se da zaključiti da prilikom loma uzorka dolazi do nepravilnog loma vaskularnih snopova i stanica parenhima.

10. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Tvrdoća je fizikalno svojstvo materijala, tj. otpor kojim se neko tijelo suprotstavlja prodiranju drugog, tvrdog tijela u njegovu površinu. Ispitivanje tvrdoće na površini ispitivanog predmeta ostavlja neznatna oštećenja, pa se može svrstati među nerazorna ispitivanja. [83] Za ispitivanja tvrdoće nije bilo potrebno izraditi uzorke posebnih dimenzija, nego su se koristili dijelovi bambusa koji su ostali pri izradi epruveta za ispitivanje udarne radnje loma pri tome da se slijedio postupak uzorkovanja.



Slika 60. Uzorci bambusa za ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće bambusa provedeno je u Laboratoriju za polimere i kompozite na uređaju Zwick & Co. KG. 3106, sukladno normi EN ISO 2039 - 1 utiskivanjem kuglice od kaljenog čelika promjera 5 mm, te opterećenjem od 49 N za ispitivanje tvrdoće unutarnje stijenke bambusa i vanjske stijenke. Pri mjerenju se sa skale uređaja očitavala dubina prodiranja kuglice nakon 10, 30 i 60 sekundi djelovanja opterećenja. Korektura uređaja iznosi 0,010 mm za opterećenje od 49N što se oduzimalo od svih očitanih vrijednosti, a zbog deformacije uređaja prilikom utiskivanja kuglice. Za svaku skupinu prikazane su vrijednosti tvrdoće vanjske i unutarnje stijenke bambusa odabranih uzoraka.



Slika 61. Uređaj Zwick 3106



Slika 62. Prikaz mjerenja tvrdoće unutarnje stijenke bambusa

Uvrštavanjem poznatih parametara; promjera kuglice i sile opterećenja, te očitanih vrijednosti uvrštenih u tablicama, pomoću izraza (1) dobiveni su podaci o tvrdoći, koji su također iskazani brojačno u tablicama.

$$H_k = \frac{1}{D\pi} \frac{F}{(h-k)} \quad (1) [84]$$

gdje je:

H_k – tvrdoća [N/mm^2],

F – sila opterećenja [N],

D – promjer kuglice [mm],

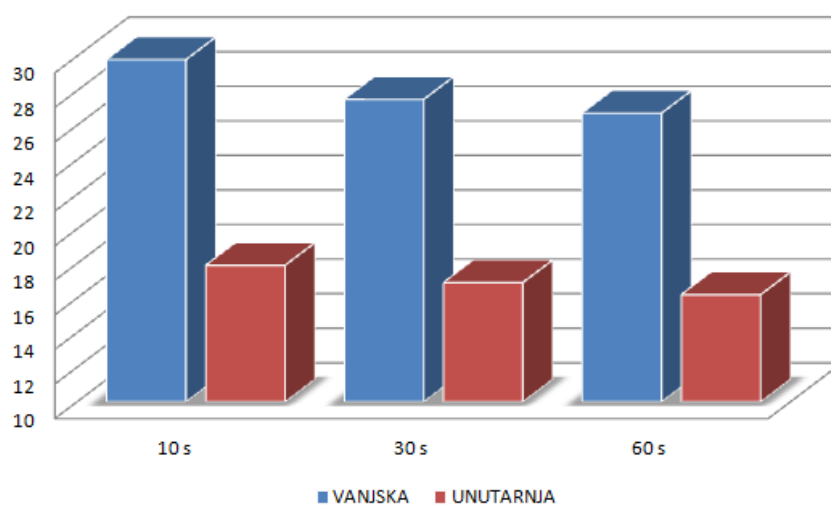
h – dubina utiskivanja [mm],

k – korekcija [84]

SUHO

Tablica 15. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka S-2

S-2	TVRDOĆA [N/mm^2]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	31,5	29,7	27,1	16,4	15,9	15,5
2	34,6	32,8	31,8	15,9	15,5	15,2
3	25,9	24,9	23,9	22,2	19,5	18,3
4	25,9	24,9	23,9	16,9	15,9	15,2
5	25,9	24,9	23,9	18,9	18,3	17,8
6	38,9	36,6	34,7	14,5	13,5	13,3
7	28,3	25,9	23,9	21,5	20,1	19,5
8	28,3	25,9	23,9	14,8	14,1	13,5
9	29,7	24,9	27,7	18,9	18,3	17,3
10	29,7	24,9	27,1	18,9	18,3	16,9
\bar{X}	29,8	27,5	26,7	17,9	16,9	16,2



Slika 63. Grafički prikaz rezultata uzorka S-2

Tablica 16. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka S-9

S-9	TVRDOĆA [N/mm ²]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	47,9	44,5	41,5	23,1	22,3	21,5
2	34,6	31,2	29,7	22,3	20,7	20,1
3	31,2	29,7	28,3	22,3	21,5	20,1
4	31,2	29,7	28,3	24,9	23,1	22,3
5	29,7	25,9	24,9	25,9	24,9	23,9
6	32,8	31,2	29,7	20,1	19,5	18,9
7	34,6	32,8	31,2	21,5	20,1	19,5
8	36,6	34,6	32,8	23,9	22,3	21,5
9	41,5	38,9	38,9	28,3	25,9	24,9
10	44,5	41,5	38,9	23,1	22,3	21,5
\bar{X}	36,5	34,1	32,4	23,5	22,3	21,4

Iz tablica 15 i 16 i grafičkog prikaza [Slika 63] vidljivo je kako se vanjska i unutarnja tvrdoća stijenke bambusa znatno razlikuje. Primjećuje se linearni pad tvrdoće nakon 10 i 60 sekundi za 10% kod vanjske i unutarnje tvrdoće. Vanjska tvrdoća uzorka S-2 nakon 60 sekundi iznosi 26,7 N/mm² dok kod uzorka S-9 iznosi 32,4 N/mm². Unutarnja tvrdoća uzorka S-2 nakon 60 sekundi iznosi 16,2 N/mm² dok kod uzorka S-9 iznosi 21,4 N/mm². Za pretpostaviti je da uzrok razlici tvrdoća između uzoraka je razlika u mjestu rezanja po visini stapke. Može biti da je uzorak S-2 koji pokazuje niže vrijednosti tvrdoće izrezan iz gornjeg dijela stupa bambusa koji je mlađi od donjeg dijela što potvrđuje razlika u debljini stijenke koja je od uzorka S-2 prosječno iznosila 4,03 mm dok je kod uzorka S-9 iznosila 4,77 mm.

VLAŽNO 1

Tablica 17. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-25

V-25	TVRDOĆA [N/mm ²]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	23,1	22,5	22,2	14,0	13,3	12,8
2	24,4	23,7	23,4	14,2	13,6	13,3
3	25,6	24,8	24,4	14,0	13,3	13,0
4	23,7	23,1	22,8	15,2	14,6	14,2
5	24,4	23,4	23,1	14,0	13,6	13,0
6	22,5	22,2	21,9	14,2	13,6	13,3
7	23,7	23,1	22,8	14,0	13,6	13,0
8	23,4	22,8	22,5	16,5	15,2	15,0
9	24,8	24,1	23,7	14,0	13,3	13,0
10	23,4	22,8	22,5	15,2	14,6	14,0
\bar{X}	23,9	23,2	22,9	14,5	13,9	13,5

Tablica 18. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-29

V-29	TVRDOĆA [N/mm ²]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	26,8	26,0	25,6	17,4	15,6	15,2
2	25,6	24,8	24,4	15,0	14,0	13,6
3	27,2	26,4	26,0	15,6	15,0	14,6
4	24,4	23,7	23,4	16,1	15,6	15,2
5	25,2	24,4	24,1	14,6	14,2	13,6
6	26,0	25,2	24,8	15,2	15,2	15,0
7	23,7	23,1	22,8	15,0	14,2	13,6
8	26,0	25,2	24,8	15,6	15,2	15,0
9	25,6	24,8	24,4	14,6	14,2	13,6
10	25,2	24,4	24,1	16,1	15,6	15,2
\bar{X}	25,6	24,8	24,4	15,5	14,8	14,4

VLAŽNO 5

Tablica 19. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-12

V-12	TVRDOĆA [N/mm ²]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	23,1	22,2	20,7	11,5	10,9	10,7
2	23,9	23,1	22,2	10,7	10,2	9,9
3	20,1	18,9	18,3	11,7	11,1	10,9
4	22,3	21,5	20,7	10,9	10,4	10,0
5	21,5	20,8	20,1	11,5	10,9	10,5
6	23,1	21,5	20,7	12,4	11,7	11,3
7	23,9	23,1	22,2	11,7	11,1	10,7
8	22,2	20,7	20,1	11,9	11,5	11,1
9	21,5	20,7	20,1	11,3	10,7	10,3
10	23,1	21,5	20,7	12,2	11,7	11,3
\bar{X}	22,5	21,4	20,6	11,5	11,0	10,6

Tablica 20. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-18

V-18	TVRDOĆA [N/mm ²]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	24,9	23,9	23,1	11,1	10,7	10,4
2	23,9	23,1	22,3	10,4	10,6	9,7
3	21,5	20,1	19,5	11,3	10,8	10,6
4	23,9	23,1	22,3	12,4	11,7	11,3
5	25,9	24,9	23,9	10,7	10,2	9,9
6	21,5	20,8	19,5	12,7	12,2	11,5
7	23,9	22,3	21,5	12,2	11,5	11,1
8	22,3	21,5	20,7	10,7	10,4	10,0
9	23,9	23,1	22,3	11,7	11,3	10,9
10	23,1	22,3	21,5	12,4	11,9	11,3
\bar{X}	23,5	22,5	21,6	11,5	11,1	10,7

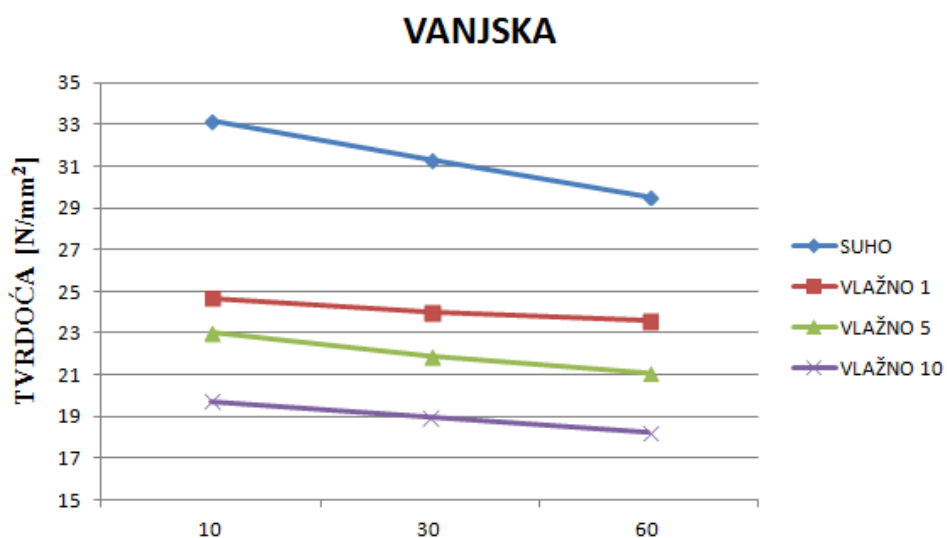
VLAŽNO 10

Tablica 21. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-1

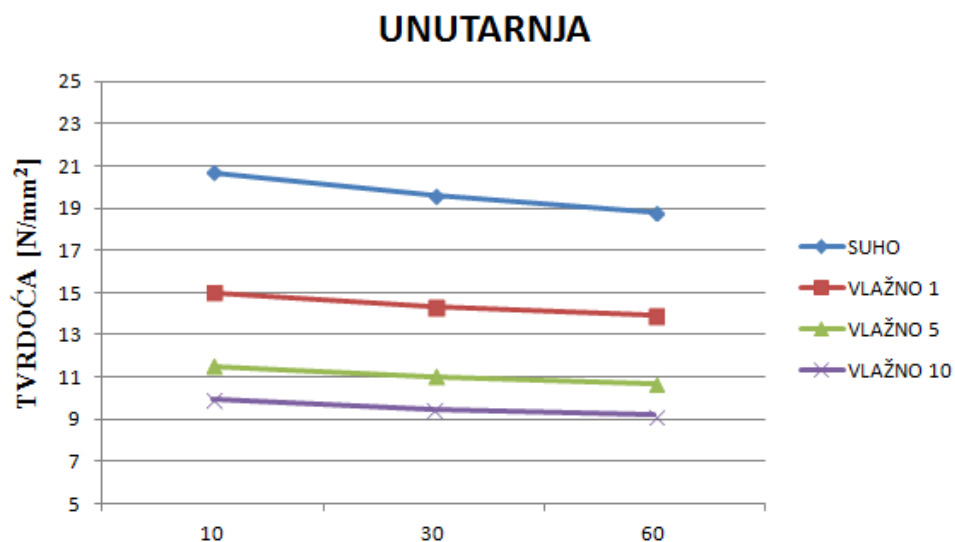
V-1	TVRDOĆA [N/mm ²]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	19,6	18,5	18,0	8,7	8,2	7,9
2	16,5	15,6	15,0	8,9	8,6	8,2
3	19,6	18,5	18,0	9,6	8,2	8,0
4	21,6	21,6	21,0	9,2	8,9	8,6
5	19,0	18,5	17,4	8,8	8,5	8,1
6	14,0	13,6	12,8	8,7	8,3	8,0
7	19,0	18,0	17,4	8,9	8,6	8,2
8	15,2	14,6	14,0	8,7	8,1	7,8
9	22,4	21,0	20,2	8,7	8,2	7,9
10	17,4	16,1	15,2	9,2	8,7	8,3
\bar{X}	18,4	17,6	16,9	8,9	8,4	8,1

Tablica 22. Rezultati ispitivanja tvrdoće uzorka V-9

V-9	TVRDOĆA [N/mm ²]					
	VANJSKA stijenka			UNUTARNJA stijenka		
	10 s	30 s	60 s	10 s	30 s	60 s
1	21,0	20,2	19,6	10,6	10,2	9,9
2	24,1	23,2	22,4	11,4	11,0	10,6
3	23,2	22,4	21,6	10,4	10,1	9,6
4	19,6	19,0	18,5	10,4	10,1	9,8
5	18,5	18,0	17,4	11,8	11,4	11,0
6	19,0	18,5	18,0	11,2	10,8	10,4
7	20,2	19,6	19,0	11,4	11,2	10,8
8	22,4	21,6	21,0	11,2	11,0	10,6
9	21,6	21,0	22,2	11,0	10,6	10,4
10	21,0	20,2	19,6	10,8	10,2	10,1
\bar{X}	21,1	20,4	19,9	11,0	10,6	10,3



Slika 64. Grafički prikaz rezultata vanjske prosječne tvrdoće



Slika 65. Grafički prikaz rezultata unutarnje prosječne tvrdoće

Rezultati ispitivanja tvrdoće pokazuju linearan pad tvrdoće nakon 10, 30 i 60 sekundi kod svih uzoraka. Primjećuje se linearni pad vanjske i unutarnje tvrdoće nakon 10 i 60 sekundi kod svih skupina, 10% kod uzoraka skupine SUHO dok kod ostalih uzoraka to iznosi 7%. Prosječna vanjska tvrdoća skupine SUHO veća je za 20% od skupine VLAŽNO 1, 30% od skupine VLAŽNO 5 i 40% od skupine VLAŽNO 10. Prosječna unutarnja tvrdoća skupine SUHO veća je za 30% od skupine VLAŽNO 1, 40% od skupine VLAŽNO 5 i 50% od skupine VLAŽNO 10. Zaključuje se da utjecaj vlage na bambus znatno snižava vrijednosti vanjske i unutarnje tvrdoće.

11. ZAKLJUČAK

Sve veća ekološka osviještenost upućuje na korištenje prirodno obnovljivih materijala s ciljem smanjenja emisije stakleničkih plinova u industriji i količine utrošene energije pri razvoju, proizvodnji i transportu proizvoda. Bicikl kao proizvod koji se kroz povijest proizvodio od različitih materijala, poput čelika i aluminija, najveći stupanj svoje tehnološke razvijenosti dosegao je kada su se okvir bicikla kao i poneki ostali dijelovi počeli proizvoditi od ugljičnih vlakana u polimernoj matrici. Takav proizvod zbog svoje cijene nije dostupan široj populaciji ljudi i nije na strani prirodno obnovljivih materijala, kao ni bicikli od čelika i aluminija. Ovdje svoju svrhu pronalazi bambus kao prirodni, jeftin i materijal dobrih mehaničkih svojstava. U ovom radu provedena su ispitivanja žilavosti, izvijanja i tvrdoće Tonkin bambusa, prije i nakon izlaganja uvjetima u vlažnoj komori od 1, 5 i 10 dana. Pošto je cijev sjedala okvira bicikla opterećena na izvijanje. Dobivenim rezultatima ustanovilo se da se Tonkin bambus može koristiti pri proizvodnji bicikla. Mehanička svojstva bambusa znatno opadaju s povećanjem udijela vlage. Porastom udjela vlage u bambusu za 5%, 13% i 20%:

- iznos naprezanja izvijanja se smanji za 22%, 25% odnosno 28%
- modul elastičnosti smanjuje se za 25%, 27% i 30%
- udarna radnja loma materijala smanjuje se za 21%, 22% i 26%
- prosječna vanjska tvrdoća smanjuje se za 20%, 30% i 40%
- prosječna unutarnja tvrdoća smanjuje se za 30%, 40% i 50%.

Preporuča se površinska zaštita bambusa, bojom ili lakovima, kako bi se minimizirao utjecaj vlage na bambus i time spriječilo narušavanje mehaničkih svojstava bambusa.

Danas znanost i tehnologija omogućuju nove načine upotrebe bambusa kao prirodnog obnovljivog materijala čija popularnost i broj proizvoda raste iz dana u dan. Najveći problem je transport bambusa pošto ne raste svugdje u svijetu što osim ekološkog problema predstavlja i ekonomski jer dovodi u pitanje isplativost krajnjeg proizvoda.

LITERATURA

- [1] <http://www.dw.com/hr/na-pedalama-u-prolje%C4%87e/a-17523505> [16.11.2017.]
- [2] <http://www.telegram.hr/zivot/ako-vas-je-zanimalo-kako-su-se-razvijali-bicikli-ovo-je-kratak-pregled-njihove-povijesti/> [16.11.2017.]
- [3] <https://www.prometna-zona.com/bicikli/> [22.11.2017.]
- [4] <http://www.dropbike.com/povijest-biciklizma-jucer-danas-sutra/> [17.11.2017.]
- [5] <https://sites.google.com/site/biciklzagreb/bicikl-kroz-povijest> [18.11.2017.]
- [6] Goreta, M., Izbor materijala za izradu bicikla, diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Split, 2013.
- [7] <https://mtnweekly.com/sports/biking/5-reasons-buy-tandem-bicycle> [22.11.2017.]
- [8] http://tktamis.org.rs/tktamis/wp-content/uploads/2013/03/biciklisti%C4%8Dki_priru%C4%8Dnik_HBS_izdanje.pdf [28.11.2017.]
- [9] Van der Plas, R., Baird, S.: Bicycle Technology, Cycle Publishing, San Francisco, 2010.
- [10] Haine, C.: The Urban Biking Handbook: The DIY Guide to Building, Rebuilding, Tinkering with, and Repairing Your Bicycle for City Living
- [11] https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/general_interest/sport_mins/bicycle.pdf [5.12.2017.]
- [12] <https://rog-joma.hr/blog/biciklizam-pocetnici-anatomija-dijelovi-bicikla/> [30.11.2017.]
- [13] <http://www.bikegremlin.com/2015/08/19/velicina-rama-bicikla/> [9.12.2017.]
- [14] http://www.bikeoff.org/design_resource/dr_PDF/materials.pdf [25.11.2017.]
- [15] Filetin, T.; Kovačiček, F. and Indof, J.: Svojstva i primjena, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [16] <http://zg-magazin.com.hr/robotska-ruka-proizvela-neobican-celicni-okvir-bicikla/> [27.11.2017.]
- [17] <http://faq.haerbe.net/tekstovi/materijali.htm> [27.11.2017.]
- [18] <https://pdfs.semanticscholar.org/d11a/2728a7af795053983a666e649ddb6d5cb2c6.pdf> [25.11.2017.]
- [19] Dwyer, F; Shaw, A.; Tombarelli R.; Material and Design Optimization for an Aluminum Bike Frame, Worcester Polytechnic Institute, Degree of Bachelor of Science Thesis, Travanj 2012.

- [20] Colins, P., A brief history and future of materials in the cycling industry, School of Engineering, Deakin University, Bicycle Materials Australia Vol 46, Br.2, Lipanj 2013.
- [21] C. Rontescu, T. D. Cicic, C. G. Amza, O. Chivu, D. Dobrotă, Choosing The Optimum Material For Making A Bicycle Frame, METABK 54(4), 679-682, 2015.
- [22] http://www.bikeoff.org/design_resource/dr_PDF/materials.pdf [5.12.2017.]
- [23] <https://keindl-sport.hr/blog/cube-attain-ulaz-visoko-drustvo-30/> [5.12.2017.]
- [24] http://www.bikeoff.org/design_resource/dr_PDF/materials.pdf [9.12.2017.]
- [25] http://www.bikecyclingreviews.com/how_to_clean_a_titanium-frame.html [3.12.2017.]
- [26] <http://www.classicbikeshop.eu/frame-KirkPrecision-details.html> [30.11.2017.]
- [27] <http://www.e-vozila.com/forum/viewtopic.php?t=275> [15.12.2017.]
- [28] <https://connorcycles.com/bikes/woody-mountain/durt-mountain-bike/> [18.12.2017.]
- [29] http://www.bbc.co.uk/manchester/content/articles/2008/06/13/160608_cardboard_bike_feature.shtml [22.11.2017.]
- [30] <http://www.thefiscaltimes.com/Articles/2012/07/14/This-Man-Made-the-Coollest-Cardboard-Bicycle-Ever#page1> [18.12.2017.]
- [31] <https://makezine.com/cardboard-bicycle-prototype/> [22.12.2017.]
- [32] <https://www.dezeen.com/2012/11/12/cardboard-bicycle-by-izhar-gafni/> [7.12.2017.]
- [33] <http://www.bikeforest.com/homebuild28.php> [20.12.2017.]
- [34] <http://www.onyx-composites.de/forschung-und-entwicklung/hanfbike/> [18.12.2017.]
- [35] <https://www.mobitecture.com/portfolio/hemp-bike/> [16.12.2017.]
- [36] Penava, F., Primjena bambusa pri izradi bicikla, diplomski rad, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [37] <http://www.instructables.com/id/How-I-built-a-carbon-bike-frame-at-home-and-a-bam/> [28.11.2017.]
- [38] <http://www.theplantlist.org/1.1/browse/A/Poaceae/Bambusa/> [15.12.2017.]
- [39] <http://www.horti-kultura.hr/bambus-enigma-21-stoljeca/> [22.12.2017.]
- [40] <https://candysdirt.com/2013/09/05/get-this-outlawing-bamboo-in-new-york-and-connecticut-go-to-jail-if-you-grow-it/> [22.11.2017.]
- [41] <https://www.webgradnja.hr/clanci/bambus-sve-prisutnji/147/> [23.12.2017.]
- [42] http://www.web500.com.br/Bambus_Fotos_Site/Hausbau_mit_Bambus_Payer-10.html [18.12.2017.]
- [43] <http://prirodna.hr/stranice/vrt/bioVRT/Bambus> [9.12.2017.]

- [44] <http://www.flaviodeslandes.com/bamboo.html> [15.12.2017.]
- [45] Liese, W.; Köhl, M., *Bamboo – The Plant and its Uses*, University of Hamburg, Tropical Forestry, ISBN 978-3-319-14133-6, Siječanj 2015
- [46] Stapleton, C.M.A., *The morphology of woody bamboos*, Royal Botanic Gardens, The Bamboos:251-267, 1997
- [47] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.553.9762&rep=rep1&type=pdf> [28.12.2017.]
- [48] <https://lewisbamboo.com/clumping-vs-running-bamboo/> [29.12.2017.]
- [49] <https://www.jutarnji.hr/domidizajn/savjeti/evo-kako-sami-mozete-razmnoziti-bambus/6013281/> [27.12.2017.]
- [50] Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing Xiaobo Li Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2004.
- [51] Wolfram Schott, *Bamboo in the Laboratory*, Studeni 2006.
- [52] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953400000386> [27.12.2017.]
- [53] Scurlock J.M.O, Dayton D.C, Hames B, *Bamboo: an overlooked biomass resource?*, Biomass and Bioenergy 2000, 19, 229 do 244
- [54] <http://bamboo.wikispaces.asu.edu/4.+Bamboo+Properties> [29.12.2017.]
- [55] Zhou Aiping, Huang Dongsheng, Li Haitao, Su Yi, Hybrid approach to determine the mechanical parameters of fibers and matrixes of bamboo, *Construction and Building Materials* 35 (2012) 191–196
- [56] T. Tan, N. Rahbar, S.M. Allameh, S. Kwofie, D. Dissmore, K. Ghavami, W.O. Soboyejo, Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures, *Acta Biomaterialia* 7 (2011) 3796–3803
- [57] Janssen, J.A.: *Bamboo research at the Eindhoven University of Technology*, Eindhoven, 1990.
- [58] Ahmad, M. and Kamke, F.A.: *Mechanical Properties of Calcutta Bamboo*. Ph.D. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Ch.4, 2000.
- [59] K.F. Chung *, W.K. Yu; Mechanical properties of structural bamboo for bamboo Scaffoldings, *Engineering Structures* 24 (2002) 429–442
- [60] Tommy Y. Lo*, H.Z. Cui, H.C. Leung; The effect of fiber density on strength capacity of bamboo, *Materials Letters* 58 (2004) 2595– 2598

- [61] Cyril Okhio Ph.D., C.Eng.; Jeroen Waning, B.Sc.; Yemeserach T. Mekonnen, B.Sc.; An Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Bamboo and Cane, (JSAB), 2011
- [62] Michael R.G.; Microstructure and mechanical properties of bamboo in compression, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Bachelor Thesis, 2012.
- [63] Khalil A, Bhat I.U.H , Jawaid M, Zaidon A, Hermawan D, Hadi Y.S, Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review, *Materials and Design* 2012, 42, 353 do 369
- [64] T. Gutu A Study on the Mechanical Strength Properties of Bamboo to Enhance Its Diversification on Its Utilization, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-5, 2013.
- [65] Bhavna Sharma, Ana Gatóo, Maximilian Bock, Michael Ramage; Engineered bamboo for structural applications, *Construction and Building Materials* 81 (2015) 66–73
- [66] Bhavna Sharma, Gatóo, A., Michael H. Ramage Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo; *Construction and Building Materials* 83 (2015) 95–101
- [67] Ogunbiyi, Moses A., Olawale, Simon O., Tudjegbe, Oke E., Akinola, S. R., Comparative Analysis Of The Tensile Strength Of Bamboo And Reinforcement Steel Bars As Structural Member In Building Construction, 2015.
- [68] Suzana Jakovljević, Dragutin Lisjak, Željko Alar, Frano Penava, The influence of humidity on mechanical properties of bamboo for Bicycles, 2017 35–48
- [69] Gielis, J.. 2002. Future possibilities for bamboo in European agriculture. Oprins Plant Sint-Lenaartsesteenweg 91 B-2310 Rijkevorsel
- [70] <http://www.fao.org/docrep/007/j1974e/J1974E35.htm> [25.11.2017.]
- [71] https://www.google.hr/search?q=bamboo+scaffolding&num=100&source=lnms&tbn=i sch&sa=X&ved=0ahUKEwiRlOjG38jYAhURoqQKHaj-AiEQ_AUICigB&biw=1517&bih=707#imgdii=n46BhQrYUh1HzM:&imgsrc=8ILYD-aveP233M: [28.11.2017.]
- [72] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953400000386> [18.12.2017.]
- [73] <http://gradjevinarstvo.rs/tekstovi/3075/820/bambus-u-gra%C4%91evinarstvu-da-li-je-trava-uvek-zelenija> [9.12.2017.]

- [74] <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/45460/Portales%3BEsteve%3BRicardo%20Moreno%20Cuesta%20-%20Bamboo%2C%20from%20traditional%20crafts%20to%20contemporary%20design%20an....pdf?sequence=1&isAllowed=y> [19.12.2017.]
- [75] <https://keindl-sport.hr/koja-velicina-okvira/> [22.12.2017.]
- [76] <https://repozitorij.gfos.hr/islandora/object/gfos%3A44/datastream/PDF/view> [22.12.2017.]
- [77] Strojarski priručnik, Bojan Kraut, Tehnička knjiga, Zagreb, 2009.
- [78] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69647> [28.12.2017.]
- [79] Mandić, D., Utjecaj uvjeta pripreme kompozita na svojstva, diplomski rad, Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [80] Franz, M., Mehanička svojstva materijala, Zagreb, 1998.
- [81] Filetin, Tomislav; Franz, Mladen; Španiček, Đurđica; Ivušić, Vinko: Svojstva i karakteristike materijala - Katalog opisa, Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [82] G. Mršić, S. Tugaj; Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX); stručni članak; Zagreb; 2007.
- [83] Lončar A., Vojvodić D., Komar D., Vlaknima ojačani polimeri, Zagreb, 2006.
- [84] Franz M., Kovačiček F., Novosel M., indof J., Inženjerski priručnik ip4, 1. svezak, ŠK, Zagreb, 1998.